

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

Patricia Michele Pereira Trindade

**ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA EM SANTA
MARIA – RS A PARTIR DE IMAGENS TERMAIS LANDSAT 8 E
EXPERIMENTO DE CAMPO**

**Porto Alegre, RS
2018**

Patricia Michele Pereira Trindade

**ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA EM SANTA
MARIA – RS A PARTIR DE IMAGENS TERMAIS LANDSAT 8 E
EXPERIMENTO DE CAMPO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Sensoriamento Remoto**.

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha
Coorientador: Waterloo Pereira Filho

Porto Alegre, RS
2018

CIP - Catalogação na Publicação

Trindade, Patricia Michele Pereira

Análise espaço temporal da temperatura em Santa Maria - RS a partir de imagens termais Landsat 8 e experimento de campo / Patricia Michele Pereira Trindade. -- 2018.

150 f.

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha.

Coorientador: Waterloo Pereira Filho.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Ilhas de calor urbanas. 2. Infravermelho termal. 3. Clima urbano. 4. Características ambientais. 5. Estimativa de temperatura. I. Luderitz Saldanha, Dejanira, orient. II. Pereira Filho, Waterloo, coorient. III. Título.

Patricia Michele Pereira Trindade

**ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA EM SANTA
MARIA – RS A PARTIR DE IMAGENS TERMAIS LANDSAT 8 E
EXPERIMENTO DE CAMPO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Sensoriamento Remoto**.

Aprovada em 19 de dezembro de 2018

Dra. Dejanira Luderitz Saldanha, Dr. (UFRGS)
(Orientadora)

Dr. Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)
(Presidente/Coorientador)

Dra. Aline Biasoli Trentin (UNIPAMPA)

Dra. Michele Monguilhott (UFSC)

Dra. Tatiana Mora Kuplich (INPE)

**Porto Alegre, RS
2018**

AGRADECIMENTOS

Eu não poderia deixar de agradecer as pessoas que me acompanharam e contribuíram para a realização da minha pesquisa. Então agradeço:

Primeiramente à Deus pela minha vida repleta de realizações, pela minha família maravilhosa, e meus verdadeiros amigos.

Ao meu esposo Aécio Dambrowski dos Santos que sempre esteve ao meu lado me incentivando e ajudando a encontrar o melhor caminho para atingir meus objetivos.

A toda minha família, em especial, meu pai Vanderlei e vó Flora, pelo incentivo e ajuda nos estudos e na minha vida toda; à minha mãe Carla pelo carinho; às minhas tias Ivanir, Elizandra e Sandra por sempre estarem perto de mim contribuindo para minha formação pessoal; e aos meus tios Rodrigo, Rafael e Alessandro por serem os melhores tios que alguém poderia ter.

A todas as minhas amigas, que estiveram comigo antes e durante o doutorado, em especial à Franciele Plate Florence, Caroline Moraes, Camila Brondani, Nara Andrade, Lisélen Ávila, Joseana Giacomini e Jocelaine Valcarengi pela amizade incomparável e verdadeira.

A todas as minhas amigas conquistadas durante a vida acadêmica, em especial à Greice Silveira, Ingrid Welter, Marcieli Carpes, Gustavo Toniolo, Joceli Gross, Pedro Santos, Felipe Correa e Diego Prado, pela companhia nas dificuldades e por momentos alegres.

Às minhas novas amigas e companheiras Manoela Sachis Lopes, Gisieli Kramer e Juliana Tramontina que me acompanharam durante o doutorado e certamente serão amigas eternas.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias (LABGEOTEC): Eduardo Kaiser, Cristiano Niederauer, Ademir Peranzoni, Marcos Santos, Janderlei Dal Osto e Rafael Dezordi.

Ao pessoal do laboratório de Micrometeorologia – UFSM pelo apoio na construção dos abrigos, em especial ao Josué Sehnem e Cláudio Alberto Teichrieb.

À professora Dejanira Luderitz Saldanha por ter me recebido de braços abertos na UFRGS e que sempre me incentivou muito para a realização do projeto.

Ao professor Waterloo Pereira Filho, pela orientação e amizade e principalmente pela contribuição na minha formação profissional nos últimos 10 anos.

A todas pessoas que concederam espaço para instalação dos instrumentos utilizados nesta pesquisa e que também se tornaram novos amigos: Paulo Castaman, Ladi Rodrigues Toniolo e Gilberto Bordin Toniolo, Alberto Lorensi, Alison Wolfat, Onira Padilha e Perci, Suyan Neves, Marli Aita, Josele Fernantes e Dolair Lorensi.

À Aline Biasoli Trentin, Michele Monguillott e Tatiana Mora Kuplich por aceitarem o convite para a participação da comissão avaliadora desta pesquisa e pelas contribuições dadas para apresentação do texto final.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudos que contribuiu para a realização da pesquisa.

ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA EM SANTA MARIA – RS A PARTIR DE IMAGENS TERMAIS LANDSAT 8 E EXPERIMENTO DE CAMPO

Autora: Patricia Michele Pereira Trindade

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha

Coorientador: Waterloo Pereira Filho

Resumo: Diante do cenário atual de crescente urbanização fica evidente a importância de pesquisas relacionadas aos impactos que a artificialização do meio pode acarretar no clima urbano. Assim, o objetivo da presente pesquisa foi analisar a variação espaço temporal da temperatura e ilhas de calor urbanas em Santa Maria-RS, levando em consideração as suas características ambientais (relevo, vegetação, áreas construídas) e as relações entre dados orbitais e de campo. A primeira etapa da pesquisa correspondeu à análise da variação da temperatura de superfície e ilhas de calor na cidade a partir de imagens Landsat 5 e 8 para o período 1994 à 2014. A segunda etapa consistiu em verificar as diferenças térmicas entre o espaço urbano e o entorno rural do município no período de março/2017 a março/2018 a partir de pontos fixos de coletas de dados e imagens orbitais Landsat 8. Na terceira etapa realizou-se a análise da temperatura e ilhas de calor urbanas para diferentes classes de compartimentação fisiográfica da área urbana definidas a partir da hipsometria e grau de ocupação verde da cidade. Assim, foram utilizados os dados de campo e imagens Landsat 8, Sentinel 2A e modelo digital de superfície (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Na última etapa foram gerados quatro modelos de estimativa da temperatura do ar com o uso do infravermelho termal. Os modelos foram calculados a partir das relações entre dados de campo e imagens termais corrigidas por diferentes métodos para o ano de 2017. A validação foi realizada com os coeficientes de determinação (r^2), índice Willmott (d), índice *Nash e Sutcliffe* (NSE), erro médio absoluto (EMA) e raiz do erro médio quadrático (REMQ) em dados de 2018. Na análise temporal de 1994 à 2014, foi possível constatar aumento das áreas com temperaturas de superfície mais elevadas, o que pode ser justificado pelo incremento das áreas construídas na cidade, já que a taxa de crescimento foi de 70%. As ilhas de calor urbanas de maior intensidade, referentes ao período supracitado, foram identificadas nas imagens da primavera e verão. Na segunda abordagem, em relação à análise da temperatura do ar observada em campo verificou-se que as maiores diferenças entre o urbano e rural foram registradas nos períodos da noite e madrugada, com valores superiores em média a 2°C. Na terceira discussão, a partir da compartimentação fisiográfica verificou-se que 28% dos locais delimitados pelo contorno das áreas construídas caracterizaram-se por grau de ocupação verde 1 (áreas com densa urbanização) e 2 (área residencial com pouca arborização) e hipsometria de 60 a 200 metros com ilhas de calor de forte magnitude ($>3^{\circ}\text{C}$). Por fim, os resultados obtidos demonstraram que os quatro modelos de regressão gerados apresentaram bom desempenho, no entanto, nos modelos 1, correspondente à relação entre temperatura do ar (Tar) e temperatura de brilho (Tbt) e 3, referente a relação entre temperatura do ar e temperatura de superfície corrigida pelo método *Radiative Transfer Equation* (TSr) os erros de estimativa foram menores, com REMQ de 0,7°C no modelo 1. A análise integrada das características térmicas, relevo e vegetação possibilitou a identificação de locais que merecem atenção especial por parte dos gestores públicos quanto às ilhas de calor e falta de áreas verdes. Diante do exposto, cabe destacar a contribuição dos produtos de sensoriamento remoto nas análises realizadas.

Palavras-chave: urbano, rural, dados orbitais, experimento de campo, compartimentação fisiográfica, modelos de regressão.

SPATIOTEMPORAL ANALYSIS OF TEMPERATURE IN SANTA MARIA – RS, BRAZIL, THROUGH LANDSAT 8 THERMAL IMAGES AND FIELD EXPERIMENT

Author: Patricia Michele Pereira Trindade

Adviser: Dejanira Luderitz Saldanha

Adviser: Waterloo Pereira Filho

Abstract: In view of the current scenario of crescent urbanization, the importance becomes evident of research directed toward the impact that artificialization of the environment can cause on urban climate. Thus, the objective of this present research was the analysis of spatiotemporal variation of temperature and urban heat islands in Santa Maria – RS, Brazil, taking into consideration its environmental characteristics (terrain, vegetation, constructed areas) and the relationship between orbital and field data. The first stage of the research corresponded to the analysis of surface and heat island temperature variation in the city through Landsat 5 and 8 images for the period between 1994 and 2014. The second stage consisted of the assessment of thermal differences between urban space and the city's surrounding rural area during the period of March/2017 until March/2018 from fixed points of Landsat 8 orbital data and images collection. In the third stage, the analysis of temperature and urban heat islands was performed for different classes of physiographic compartmentalization of urban area derived from the city's hypsometry and its degree of green area. For this purpose, field data, Landsat 8 and Sentinel 2A images, and the digital surface model (DSM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) were used. During the last stage, four air temperature estimation models were generated with the use of thermal infrared. The models were calculated from the relationship between field data and thermal images for the year 2017 corrected with different methods. The validation was performed with the coefficient of determination (r^2), Willmott index (d), Nash-Sutcliffe Efficiency index (NSE), mean absolute error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE) for data from 2018. In the temporal analysis from 1994 to 2014, it was possible to verify an increase of areas with higher surface temperature, which can be justified by the increment of constructed areas in the city, since the rate of increase was of 70%. The urban heat islands of greater intensity belonging to the aforementioned period were identified in the spring and summer images. In the second approach, regarding the analysis of air temperature observed in the field, it was verified that the greater differences between urban and rural areas were registered during the night and before dawn with mean values higher than 2°C. In the third discussion it was verified, from the physiographic compartmentalization, that 28% of the sites delimited by the outline of constructed areas were characterized by the degree of green area 1 (areas with high urban density) and 2 (residential areas with few trees) and hypsometry of 60 to 200 meters with heat islands of great magnitude (>3°C). Finally, the results obtained showed that the four models of regression generated presented great performance; however, in the models 1, regarding the relationship between air temperature (AT) and brightness temperature (BT), and 3, regarding the relationship between air temperature and surface temperature corrected by the Radiative Transfer Equation (RTE) method, the estimate errors were smaller, with RMSE of 0,7°C in the model 1. The integrated analysis of the thermal characteristics, terrain, and vegetation enabled the identification of sites that merit special attention from public officials in relation to heat islands and the lack of green areas. In view of what has been presented, the contribution of the remote sensing products in the analyses performed should be highlighted.

Keywords: urban, rural, orbital data, field experiment, physiographic compartmentalization, regression models.

SUMÁRIO

CONFIGURAÇÃO DA TESE	14
CAPÍTULO I. ASPECTOS INTRODUTÓRIOS	15
I.1 INTRODUÇÃO	15
I.2 OBJETIVOS	18
I.2.1 Objetivo Geral	18
I.2.2 Objetivos específicos	18
I.3 ÁREA DE ESTUDO	19
I.4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
I.4.1 O clima urbano	22
I.4.2 Aspectos das ilhas de calor urbanas	24
I.4.3 Sensoriamento remoto aplicado a estudos urbanos	28
I.4.4 Infravermelho termal para a análise da temperatura em áreas urbanas.....	33
REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO II. UTILIZAÇÃO DO INFRAVERMELHO TERMAL NA ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E ILHAS DE CALOR URBANAS	45
CAPÍTULO III. ANÁLISE DAS VARIAÇÕES SAZONAIS DA TEMPERATURA NA ÁREA URBANA E ENTORNO RURAL DE SANTA MARIA – RS, BRASIL, A PARTIR DE PONTOS FIXOS DE COLETA DE DADOS E IMAGENS ORBITAIS	64
CAPÍTULO IV. ILHAS DE CALOR E COMPARTIMENTAÇÃO FISIAGRÁFICA DE SANTA MARIA – RS COM AUXÍLIO DE SENSORES REMOTOS	95
CAPÍTULO V. MODELOS DE ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA DO AR PARA ÁREAS URBANAS A PARTIR DE IMAGENS DO INFRAVERMELHO TERMAL COM DIFERENTES MÉTODOS DE CORREÇÃO	120
CAPÍTULO VI. CONSIDERAÇÕES GERAIS	147

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

Figura 1 - Localização da cidade de Santa Maria - RS.	19
Figura 2 - Fotografia da cidade de Santa Maria com destaque para o Rebordo do Planalto....	20
Figura 3 - Espacialização da compartimentação Geomorfológica do limite urbano de Santa Maria (distrito sede).....	21
Figura 4 - Perfil da ilha de calor urbana.	26
Figura 5 - Configuração de um transecto típico de uma ilha de calor urbana.....	26
Quadro 1 - Características das bandas Landsat 8..	30
Quadro 2 - Características das bandas Sentinel 2A.....	31

CAPÍTULO II

Fig. 1 - Localização Santa Maria - RS.	48
Fig. 2 - População de Santa Maria.....	49
Fig. 3 - Dados meteorológicos A) precipitação; B) Umidade do ar; C) Temperatura do ar; D) Velocidade do vento.	50
Fig. 4 - Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.	51
Fig. 5 - Expansão urbana da área de estudo.	54
Fig. 6 - Imagens de temperatura de superfície para janeiro de 1994, 2005 e 2014.....	55
Fig. 7 - Imagens de temperatura de superfície para abril de 1996, 2007 e 2013.....	56
Fig. 8 - Imagens de temperatura superfície para agosto de 1996, 2007 e 2013.	56
Fig. 9 - Imagens de temperatura de superfície para novembro de 1998, 2005 e 2013.....	57
Fig. 10 - Representação das ilhas de calor urbanas para as quatro estações do ano.....	58
Fig. 11 - Área que as ilhas de calor urbanas representaram na série temporal de imagens estudadas.....	59

CAPÍTULO III

Figura. 1- Localização da área de estudo Santa Maria – RS.	68
Figura. 2 - a: data logger; b: interface com o computador.	69
Figura. 3 - Abrigo construído: a) abrigo pronto no suporte; b) abrigo instalado em campo; c) aferição entre abrigos.....	71
Figura. 4 - Localização dos pontos fixos em áreas urbanas e rurais de Santa Maria - RS.....	72
Figura. 5 - Trabalho de campo para coleta dos registros de cada data logger.....	73
Figura. 6 - Histogramas de frequência da temperatura do ar de cada ponto durante o período março/2017 a março/2018.	76
Figura. 7 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação outono/2017 em Santa Maria – RS.....	78
Figura. 8 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação inverno/2017 em Santa Maria – RS.....	80
Figura. 9 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação primavera/2017 em Santa Maria – RS.....	82
Figura. 10 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação verão/2017/2018 em Santa Maria – RS.....	84
Figura. 11 - Temperatura do ar média para cada período do dia de março/2017 a março/2018 em Santa Maria – RS.....	86
Figura. 12 - Temperatura de Superfície para as imagens de 01/04/2017, 07/08/2017, 11/11/2017 e 15/02/2018.	88
Figura. 13 - Comparação entre temperatura do ar (Tar) e temperatura de superfície (TS) em cada ponto.....	90
Quadro. 1 - Materiais utilizados na construção de abrigos para os data loggers.....	70
Quadro. 2 - Característica dos pontos fixos.....	72

CAPÍTULO IV

Figura.. 1 - Localização de Santa Maria – RS, Brasil.....	99
Figura.. 2 - Chave de interpretação para identificar classes de grau de ocupação verde (GV).....	103
Figura.. 3 - Imagens de temperatura de superfície (TS) para as estações na área urbana de Santa Maria – RS.....	107
Figura.. 4 - Ilhas de calor e de frescor urbanas em Santa Maria – RS.....	108
Figura.. 5 - Mapa de Hipsometria da área urbana de Santa Maria – RS.....	110
Figura.. 6 - a) Temperatura média para cada classe de hipsometria; b) Temperatura média por grau de ocupação verde na área urbana Santa Maria – RS.	111
Figura.. 7 - Grau de ocupação verde de Santa Maria a partir do NDVI – Sentinel.	112
Figura.. 8 - Compartimentação fisiográfica de Santa Maria com base do grau de ocupação verde e hipsometria.....	113
Figura.. 9 - a) Temperatura média por classe de compartimentação; b) ilha de calor média por classe de compartimentação.....	114
Figura.. 10 - Identificação de áreas com ilhas de calor superiores a 3°C a partir do grau de ocupação verde e hipsometria.	115

CAPÍTULO V

Figura... 1 - Localização da área de estudo	124
Figura... 2 - Fluxograma do processo metodológico.	125
Figura... 3 - Distribuição dos data loggers na área urbana de Santa Maria-RS.....	126
Figura... 4 - Gráfico com estatísticas das imagens de temperatura de brilho (Tbt), temperatura de superfície corrigida pelo método Planck Equation (TSp), temperatura de superfície corrigida pelo método Radiative Transfer Equation (TSr) e temperatura de superfície corrigida pelo método Mono-Window Algorithm (TSm).	135
Figura... 5 - Modelos de regressão linear para os dados de temperatura do ar e das imagens: a) Tar x Tbt; b) Tar x TSp; C)Tar x TSr; d) Tar x TSm.	137
Figura... 6 - Gráfico de análise de resíduos dos modelos: a) Tar x Tbt; b) Tar x TSp; c) Tar x TSr; d) Tar x TSm.	138
Figura... 7 - Imagens de temperatura para os dias 15/02/2018.....	141

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 - Emissividade de diferentes materiais na faixa de 8 a 14 μm	35
--	----

CAPÍTULO II

Tabela CII 1 - Imagens de satélite.	50
Tabela CII 2 - Qualidade da classificação Índice Kappa.....	52
Tabela CII 3 - Imagem NDVI utilizada pelo algoritmo (LST).....	52
Tabela CII 4 - Média de temperatura para cada imagem.	53
Tabela CII 5 - Área e taxa de crescimento para a classe urbano 1994-2014.....	53
Tabela CII 6 - Temperatura média para as classes de cobertura.	54

CAPÍTULO III

Tabela CIII 1 - Estatística descritiva da temperatura nos data loggers em abrigos diferentes. 75
--

CAPÍTULO IV

Tabela CIV 1 - Concordância da classificação com índice Kappa.....	104
Tabela CIV 2 - Classes de compartimentação fisiográfica (grau de ocupação verde - GV e hipsometria - HP) e classes de identificação de ilhas de calor $>3^{\circ}\text{C}$ com base no grau de ocupação verde e hipsometria em Santa Maria – RS.....	105

CAPÍTULO V

Tabela CV 1 - Algoritmo para cálculo de emissividade baseado no NDVI.....	127
Tabela CV 2 - Dados de entrada na calculadora NASA.....	128
Tabela CV 3 - Dados de entrada para o método Mono-Window Algorithm.	128
Tabela CV 4 - Equações para cálculo da Temperatura média atmosférica efetiva (T_a)	129
Tabela CV 5 - Dados de entrada para o método Radiative Transfer Equation.	129
Tabela CV 6 - Estatísticas das temperaturas (pontos de campo) para as nove datas estudadas.	136
Tabela CV 7 - Índices de validação dos modelos.....	139
Tabela CV 8 - Estatísticas dos dados observados e estimados para os pontos de validação..	140
Tabela CV 9 - Equações para estimativa da temperatura do ar a partir de imagens termais. 140	

LISTA DE SIGLAS E ABREVEATURAS

ADESM - Agência de Desenvolvimento de Santa Maria
Cfa - clima temperado húmido com verão quente
ENVI - Environment for Visualizing Images
ESA – European Space Agency
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT - Land Resources Satellite
LST - Land Surface Temperature
MAXVER - Máxima Verossimilhança
MSI – Multispectral Instrument
NDBI - Normalized Difference Built-up Index
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
NDWI - Normalized Difference Water Index
OLI- Operational Land Imager
OMM - Organização Meteorológica Mundial
RGB - Red Green Blue
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
TIRS - Thermal InfraRed Sensor
TKin - Temperatura cinética verdadeira
TM - Thematic Mapper
Trad - Temperatura radiante
Tar – Temperatura do ar
TS - Temperatura de superfície
Tbt – Temperatura de brilho
TSp – Temperatura de superfície pelo método Planck Equation
TSr – Temperatura de superfície pelo método Radiative Transfer Equation
TSm - Temperatura de superfície pelo método Mono – window algorithm
USGS - United States Geological Survey

CONFIGURAÇÃO DA TESE

A proposta para apresentação da presente pesquisa segue estruturada em seis capítulos definidos a fim de expor de forma clara os principais conceitos que nortearam o estudo, bem como as análises realizadas, resultados alcançados e principais conclusões.

No primeiro capítulo **Aspectos introdutórios** é apresentado o tema e objetivos da pesquisa, as principais características da área de estudo e os fundamentos que serviram de base para o desempenho teórico e metodológico.

O capítulo II **Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas** corresponde ao artigo publicado na Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, n.4, 2017. Este capítulo apresenta a análise da expansão urbana de Santa Maria e suas características de temperatura e ilhas de calor para o período de vinte anos (1994 a 2014), realizada a partir da utilização de imagens Landsat 5 e Landsat 8.

No capítulo III **Análise das variações sazonais da temperatura na área urbana e entorno rural de Santa Maria – RS, Brasil, a partir de pontos fixos de coleta de dados e imagens orbitais** corresponde ao artigo submetido à Revista de Geociências – UNESP. O capítulo aborda a caracterização de áreas urbanas e rurais quanto a temperatura para as estações do outono, inverno e primavera de 2017 e verão 2017/2018. Nesta análise, foram utilizados os registros de 10 *data loggers* distribuídos na área de estudo e imagens termiais Landsat 8.

O capítulo IV **Ilhas de calor e compartimentação fisiográfica de Santa Maria – RS com auxílio de sensores remotos** foi submetido à Revista Brasileira de Cartografia e apresenta as características térmicas para a compartimentação fisiográfica do perímetro das áreas construídas com base nas características hipsométricas e grau de ocupação verde.

O capítulo V **Modelos de estimativa de temperatura do ar para áreas urbanas a partir de imagens do infravermelho termal com diferentes métodos de correção** mostra os modelos de regressão linear gerados para estimativa de temperatura do ar com dados de campo e imagens termiais do ano de 2017 e validação com dados de 2018.

No capítulo VI **“Considerações gerais”** é possível verificar um panorama geral com a integração dos principais resultados e conclusões encontradas no desenvolvimento de cada artigo.

CAPÍTULO I. ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

I.1 INTRODUÇÃO

O planejamento urbano inadequado contribui para o aumento de problemas ambientais nas cidades, pois o crescimento das áreas construídas proporciona mudanças na atmosfera local, tais como: poluição do ar, aumento das temperaturas e ocorrência de ilhas de calor. A intensidade das ilhas de calor está relacionada com as mudanças nos padrões de uso e cobertura da terra, e umas das consequências é a modificação da circulação atmosférica na cidade ocasionando maior concentração de poluentes nas áreas centrais e modificações do clima urbano (OKE, 1973; CHEN, 2006; NUCCI, 2008; GARTLAND, 2010; ORTIZ e AMORIM, 2011).

De acordo com Monteiro (1976) o clima urbano pode ser definido como o clima de determinado local associado ao seu processo de urbanização, expressando as interações das condições atmosféricas atuantes e as características da superfície. Assim, o estudo do clima urbano deve ser realizado de forma dinâmica, considerando além das características atmosféricas, as particularidades geoambientais e atividades humanas em cada cidade. Neste contexto, Pinho e Orgaz (2000) destacam que as atividades humanas, como trânsito, indústrias e o uso de climatizadores de ambiente consomem muita energia e aumentam o calor no meio urbano. Como consequência, este calor é adicionado aos materiais urbanos que são aquecidos durante o dia pela radiação solar, sendo retido entre os edifícios provocando modificações no balanço de energia.

A alteração no balanço energia apresenta como consequência a modificação da inércia térmica urbana, sendo diminuída quando comparada à inércia térmica do entorno rural em decorrência da ampliação dos espaços construídos, principalmente pela diferença de calor específico entre área natural e construída. O calor específico é entendido como variação da temperatura de um material ao receber uma certa quantidade de energia. Deste modo, ao substituir as superfícies naturais (menor calor específico) por superfícies construídas (maior calor específico), ocorrerá o maior aquecimento das superfícies. De forma geral, os materiais urbanos apresentam menor capacidade térmica do que os materiais naturais, então a mesma quantidade de energia pode causar maior aquecimento da área urbana do que seu entorno rural. A urbanização também pode provocar alterações higrométricas nas cidades a partir da diminuição da umidade com a impermeabilização do solo e retirada da vegetação, provocando a redução da evaporação e evapotranspiração. Como consequência, ocorre a diminuição da perda de energia que ocorreria por meio da transformação de calor sensível em calor latente (JUNIOR E AMORIM, 2016).

No Brasil, 85% da população reside em meio urbano (World Urbanization Prospects – ONU, 2018) e a maioria dos estudos relacionados à área urbana abordam os grandes centros urbanos, apresentando um cenário carente de pesquisas relacionadas às cidades médias, das quais deve-se ter relevante atenção para que não cheguem a problemas ambientais extremos encontrados nas grandes cidades, já que apresentam-se cada vez mais em expansão. Amorim (2015) e Junior e Amorim (2016) relatam que os estudos já realizados em cidades pequenas e médias demonstraram modificações substanciais no campo térmico e higrométrico como as observadas nas grandes cidades.

Assim, pode-se afirmar que a qualidade do ambiente urbano é um importante ponto a ser discutido pelos pesquisadores e o desenvolvimento de técnicas de análise podem auxiliar na resolução dos problemas no clima urbano. Amorim (2015) destaca que grande expansão das cidades nos últimos anos tem justificado os estudos do clima urbano. Neste aspecto, pode-se citar um avanço significativo da disponibilidade de registradores automáticos que proporcionam maior compreensão das particularidades do clima em cada cidade. O registro de temperatura em diferentes períodos do dia, como madrugada, em escala de tempo em minutos colabora para compreensão das diferenças termodinâmicas entre a área urbana e entorno rural. Além disso, os registros a partir de pontos fixos permitem verificar as respostas que o meio urbano pode dar em função das condições atmosféricas (JUNIOR E AMORIM, 2016).

Neste sentido, cabe destacar também os produtos e técnicas de sensoriamento remoto como aliados nos estudos de expansão urbana e clima urbano. Foster (1985) já afirmava que o sensoriamento remoto surgiu como uma técnica eficiente para avaliar o processo de expansão do espaço urbano, possibilitando verificar o crescimento das cidades e os problemas ambientais acarretados por esse processo. A partir da utilização de produtos de sensoriamento remoto possível comparar diferentes regiões e definir tendências espaciais do desenvolvimento urbano. Pode-se dizer que os mapas produzidos por pesquisadores representam elevada importância na produção de informações de séries temporais, bem como informações atualizadas que subsidiam trabalhos de planejamento urbano (SCHNEIDER, 2003).

A partir das imagens de satélite é possível analisar as mudanças do uso e cobertura da terra, bem como a expansão urbana e a configuração do clima urbano modificado pelo adensamento das cidades. Com as diversas técnicas de processamento das imagens orbitais é possível estudar o efeito de ilhas de calor urbanas por meio de imagens do infravermelho termal, dos quais é possível extrair a temperatura de superfície de determinada área. Rao (1972) foi o pioneiro na identificação de áreas urbanas a partir de dados na faixa do infravermelho termal de imagens de satélite. Pode-se ainda citar diversos pesquisadores que utilizaram imagens do

infravermelho termal para documentar o efeito da ilha de calor urbana, como Lombardo (1985), uma das pioneiras no Brasil, Streutker (2002), Voogt e Oke (2003), Kumar et al. (2012). Segundo Ortiz e Amorim (2011) a correlação entre a temperatura de superfície e os diferentes usos e ocupação da terra é um elemento importante para estudos que visam a qualidade ambiental urbana. A elaboração de mapas de temperatura de superfície permite verificar quais são as regiões da cidade que merecem atenção por parte dos gestores públicos.

O uso de técnicas de Sensoriamento Remoto é empregado em muitos estudos e tem demonstrado resultados capazes de apontar as principais características das cidades mesmo com imagens de média resolução espacial, como é o caso dos produtos Landsat que apresentam como principal vantagem o grande acervo histórico e nível de processamento cada vez mais avançado. As imagens termais dos sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) estão disponibilizadas em resolução espacial de 30 metros (USGS, 2018) facilitando a integração com dados do visível e infravermelho próximo. Assim, cabe destacar que as imagens podem ser adquiridas em número digital (ND) ou temperatura de brilho (Tbt) e para conversão em temperatura de superfície terrestre diversos autores (BARBARIÉ et al., 2015; WANG et al., 2015; JIMÉNEZ – MUÑOZ et al., 2014; ZHANG et al. 2006; VAN DE GRIEND E OWE, 1993) aplicaram a correção da emissividade dos alvos.

Diante desta abordagem, a hipótese desta pesquisa considerou que a expansão urbana e as características do relevo e vegetação são as variáveis determinantes ao padrão térmico da cidade e que os dados sensoriamento remoto podem contribuir para a análise integrada destes fatores, apontando áreas que necessitam mais atenção quanto a temperaturas elevadas. Pode-se dizer que as imagens termais também podem auxiliar em estudos do conforto térmico da população a partir de estimativas de temperatura do ar.

Neste contexto, o objetivo geral da pesquisa foi analisar a variação espaço temporal da temperatura e ilhas de calor urbanas em Santa Maria-RS, levando em consideração as suas características ambientais (relevo, vegetação, áreas construídas) e as relações entre dados orbitais e de campo. A escolha por esta área de estudo foi motivada devido a sua importância no sistema urbano do estado e suas características do sítio urbano. Conforme Sartori (1979), Santa Maria se distingue das demais cidades do estado, pois possui um sítio urbano especial quanto as suas características do relevo e é considerada uma das cidades mais quentes do estado devido a sua baixa altitude e continentalidade. Desta forma, os resultados elaborados podem contribuir para o plano de desenvolvimento da cidade com vistas à melhoria do espaço urbano em termos de funcionalidades ambientais beneficiando a sua população.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 Objetivo Geral

Analisar a variação espaço temporal da temperatura e ilhas de calor urbanas em Santa Maria-RS, levando em consideração as suas características ambientais (relevo, vegetação, áreas construídas) e as relações entre dados orbitais e de campo.

I.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as variações na temperatura de superfície e existência de ilhas de calor urbanas na cidade de Santa Maria (RS) no período de 1994 a 2014;
- Verificar as diferenças térmicas entre o espaço urbano e o entorno rural de Santa Maria – RS no período de março/2017 a março/2018 a partir de pontos fixos de coletas de dados e imagens orbitais.
- Avaliar a temperatura e ilhas de calor urbanas para diferentes classes de compartimentação fisiográfica de Santa Maria – RS.
- Estimar temperatura do ar a partir da integração de pontos fixos de coleta de dados em campo e dados do infravermelho termal considerando diferentes métodos de correção de imagens termais para a área urbana de Santa Maria – RS.

I.3 ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Santa Maria (Figura 1) situa-se numa zona de transição geomorfológica com localização geográfica no centro do Estado do Rio Grande do Sul. De acordo com Beltrão (1979), em 1858 já existia o primeiro traçado do perímetro urbano da cidade, e foi a partir de 1970 que ocorreu o crescimento da população urbana mantendo-se até os dias atuais. A taxa de urbanização que era de 30% em 1960 passou a 95 % em 2010 de acordo com o último censo do (IBGE, 2010).

A cidade teve sua expansão urbana na direção leste-oeste, em decorrência das barreiras físicas, a Encosta da Serra Geral ao norte e os morros a sudeste (Cerrito e Mariano da Rocha), que impediram e impedem a ocupação adequada. A região oeste abriga dois conjuntos habitacionais importantes para a população trabalhadora da cidade, possibilitando uma considerável expansão urbana. A região leste é a que tem apresentado maior expansão nas últimas décadas, em decorrência do fator atrativo, a Universidade Federal de Santa Maria (ZANATTA, 2011; ADESM, 2017).

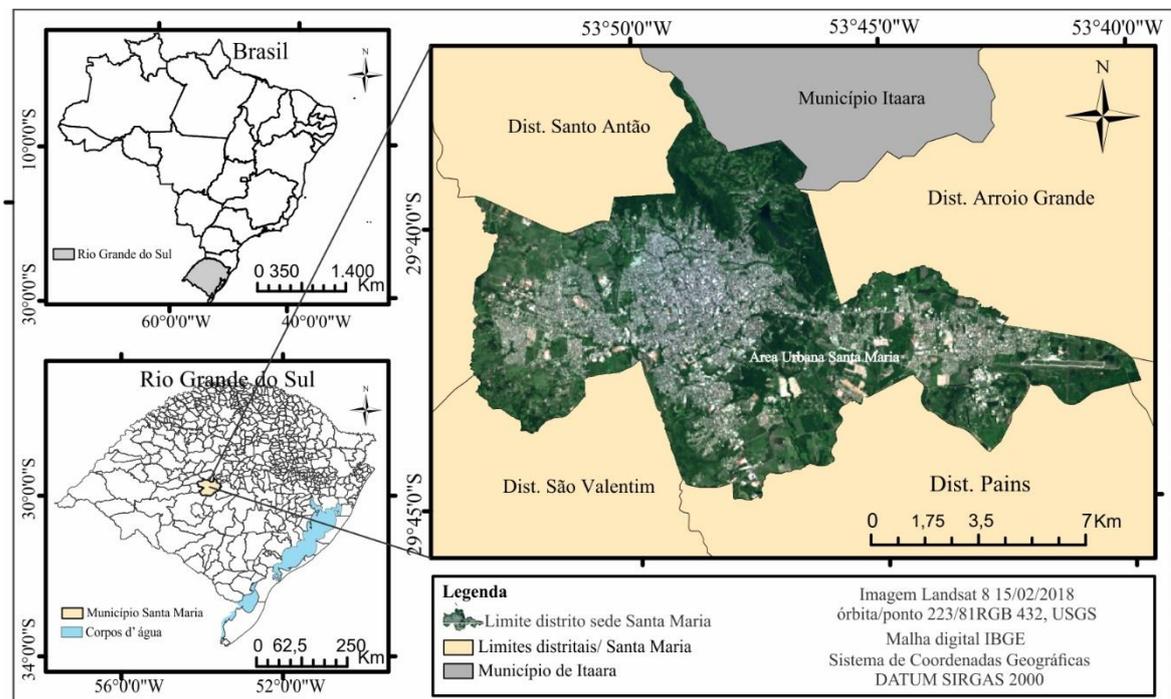


Figura 1 - Localização da cidade de Santa Maria - RS.

Fonte: elaborado pela autora.

Geomorfologicamente a cidade apresenta três unidades diferentes, a saber: 1ª Serras do Planalto Sul-Brasileiro situada ao norte abrangendo as maiores altitudes composta por um relevo ondulado, resultante do vulcanismo fissural que ocorreu na Bacia do Paraná durante a

Era Mesozoica; 2ª Rebordo do Planalto é a transição entre o Planalto e a Depressão Periférica, caracterizado por escarpas, vales e encostas íngremes, resultante da superposição dos sucessivos derrames de lava; 3ª Depressão Periférica, na qual a maior parte de Santa Maria se encontra, é caracterizada por colinas côncavas e convexas, as coxilhas, e as planícies aluviais constituídas por sedimentos recentes depositados pelos rios e arroios locais (SARTORI, 1979; SARTORI, 2009). A figura 2 apresenta uma fotografia que representa uma parte da cidade, onde é possível identificar a questão da transição entre o rebordo do Planalto e a Depressão Central.



Figura 2 - Fotografia da cidade de Santa Maria com destaque para o Rebordo do Planalto.
Fonte: <http://www.santamaria.rs.gov.br/infotur/>

Em trabalho realizado por Pires e Dal'Asta (2011) os autores determinaram diferentes níveis de compartimentação geomorfológica para o perímetro urbano de Santa Maria. A partir disto, foram individualizadas três Unidades Geomorfológicas e as características do relevo (Figura 3). A Unidade I corresponde aos Morros e Morrotes da Serra caracterizada por estar no Rebordo do Planalto com um relevo ondulado e declividade de até 30%. Os Morrotes correspondem aos morros testemunhos denominados como Cerrito e Mariano da Rocha. A Unidade II Colinas é representada por áreas de ondulação suave e ocorre na ocupação urbana. Já a Unidade III Planícies e Terraços Fluviais correspondem às áreas de deposição de sedimentos pelos canais fluviais.

Como em todo estado do Rio Grande do Sul, a vegetação nativa de Santa Maria compreende áreas campestre e de florestas. As regiões que apresentam campos nativos situam-se basicamente na Depressão central, compreendendo numerosas gramíneas, Asteráceas e Apiáceas. A Floresta Estacional Decidual está situada basicamente ao norte da cidade revestindo as encostas da Serra Geral e morros testemunhos a sudoeste, compreendendo

espécies como angico, timbaúva, caroba, louro, ipê-roxo, dentre outras (MARCHIORI, 2009). O município possui um número considerável de córregos, arroios e lajeados, destacando-se os rios Vacacaí-Mirim e Ibicuí-Mirim e os arroios Arenal, Cadena, e Ferreira. É importante destacar também que possui alto potencial de águas subterrâneas, já que o município faz parte do sistema Aquífero Guarani (SUTILI et al., 2009).

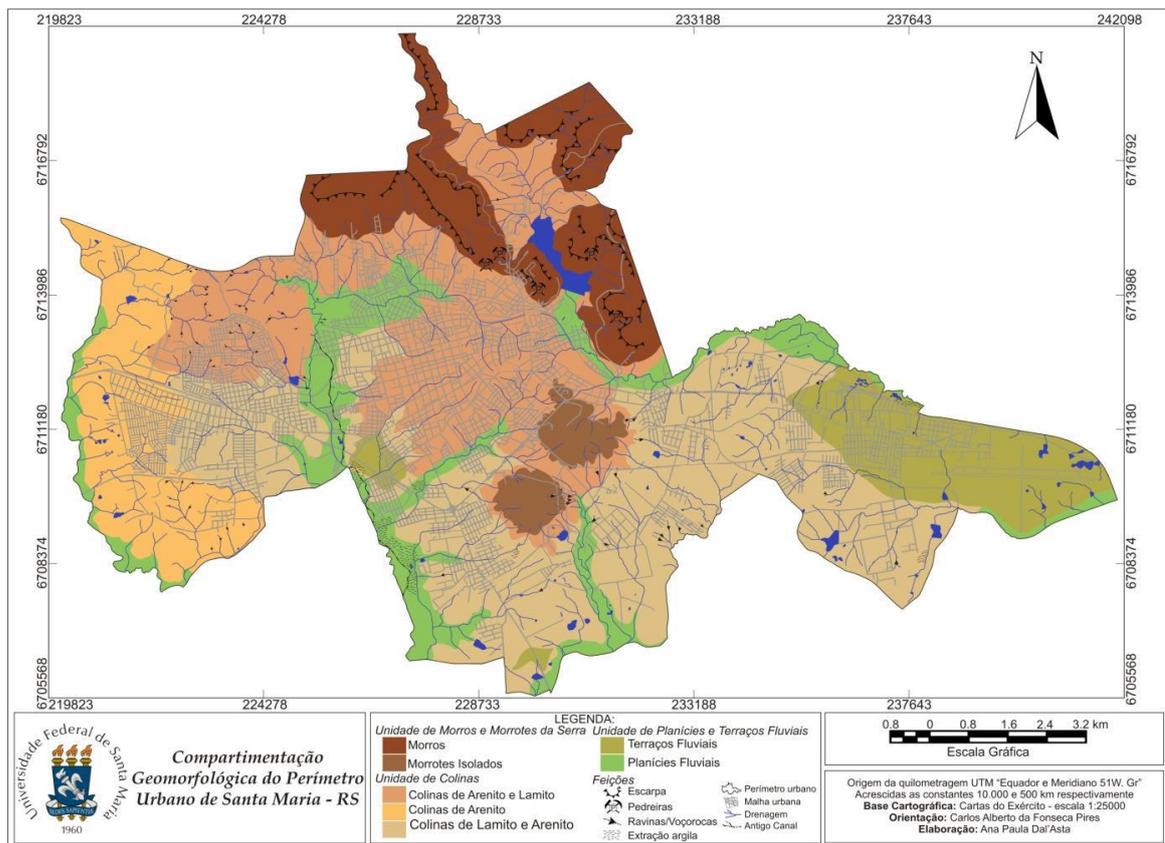


Figura 3 - Espacialização da compartimentação Geomorfológica do limite urbano de Santa Maria (distrito sede).
Fonte: Pires e Dal'Asta 2011.

Em relação ao clima, de acordo com a classificação de Köppen, a cidade apresenta clima do tipo Cfa, o que significa ser um clima subtropical, caracterizando estações do ano bem definidas. A precipitação é significativa em todos os meses do ano e verões quentes. Na classificação climática do Rio Grande do Sul definida por Rossato (2011), Santa Maria está inserida na classe Subtropical II caracterizado por clima mediantemente úmido e com variação longitudinal das temperaturas médias. A precipitação média mensal varia de 115 a 155 mm e temperatura média anual próxima à 20°C. Segundo Sartori (2000) e Heldwein et al. (2009), a cidade é uma das mais quentes do estado do Rio Grande do Sul devido ao efeito de continentalidade e baixa altitude onde está inserida, apresentando temperatura máxima próxima a 40°C nos meses mais quentes (novembro a março).

I.4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

I.4.1 O clima urbano

O clima é determinado a partir de elementos atmosféricos, como precipitação, temperatura média, vento, pressão atmosférica e nuvens. Estes elementos são definidos através de médias estatísticas de dados observacionais no período de 30 anos (HARTMANN, 1994; AYOADE, 1998). Os termos, tempo e clima, são comumente confundidos, no entanto, Sorre (1934) destaca, que apesar do clima e tempo serem relacionados, possuem significados distintos. O tempo pode ser definido como o conjunto de características atmosféricas e meteorológicas que afetam a superfície terrestre em um dado local e momento. Já o clima é o conjunto dos tipos de tempo que caracterizam determinada região. Assim, Sorre contraria a noção de clima como resultado de valores médios apenas, destacando a importância da dinâmica atmosférica e sua interação com a superfície terrestre.

Neste contexto, a partir da definição proposta por Sorre, Monteiro (1976) baseou seus estudos do clima de forma geral e do clima urbano, criando sua própria definição para o clima. Assim, conforme Monteiro, o o clima de um local é o reflexo da intensidade, extensão e duração das inter-relações existentes entre a dinâmica atmosférica e a superfície terrestre. As trocas de energias entre esses dois sistemas pode ocorrer em escala planetária ou local.

Os processos de interação entre a superfície terrestre e atmosfera ocorre em três níveis de escalas de abrangência: macroclimático, mesoclimático e microclimático. O nível macroclimático está relacionado com características do clima de amplas áreas do planeta e com movimentos atmosféricos de larga escala. O nível mesoclimático está ligado com o estudo do clima de áreas pequenas (10 a 100 Km). O nível microclimático está relacionado com o estudo do clima próximo à superfície em área muito pequena com menos de 100 metros de extensão (RIBEIRO, 1993; AYOADE, 1998). Neste sentido, pode-se dizer que o macroclima está ligado a descrição do clima geral de uma região enquanto que o mesoclima está relacionado às variações do macroclima em consequência da topografia e morfologia local. Já o microclima aborda o poder da ação humana em realizar modificações espaciais e consequente mudança no ambiente climático.

Monteiro (1976) apresentou escalas de abordagem para estudos climáticos relacionados à urbanização, a saber: zonal, regional, sub-regional e local, esta subdivide-se em mesoclima, topoclima e microclima. Segundo Ribeiro (1993) a escala zonal corresponde à circulação geral da atmosfera e sua abrangência varia de 1000 a 5000 Km de extensão. O clima na escala

regional revela o comportamento atmosférico através da variação dos tipos de tempo de uma região. Monteiro (1976) recomenda a utilização de cartas sinóticas para observação. O autor ainda fala que a escala sub-regional está ligada a espaços urbanos ao nível de grandes áreas metropolitanas. Em relação à escala local pode-se dizer que a subdivisão mesoclima está ligada a investigação do clima urbano, pois considera a relação com características fisiográficas e as transformações ocasionadas pela ação humana. O topoclima considera a forma do relevo e pode variar até 5 Km de extensão. Já o microclima está ligado com as trocas gasosas entre estruturas particularizadas e é considerado o ar que está em permanente contato com os seres humanos.

Segundo Geiger (1990) o clima da cidade depende em parte das suas características topográficas, pois os locais situados no vale tendem a apresentar diferenças térmicas em relação às cidades localizadas em planalto exposto ou situações de encosta. Nesta perspectiva, Monteiro (1990) declara que é de suma importância o conhecimento das feições topográficas do sítio urbano em estudos sobre suas variáveis climáticas, já que existem diferenças de microclima quanto à morfologia do solo, presença ou não de ocupação verde e superfícies pavimentadas. Trabalhos como Gustavson (1990), Geiger (1990) abordaram os efeitos da topografia na variação térmica em áreas urbanas, destacando a interferência da altitude na formação de microclimas.

A variação da temperatura no sítio urbano aumenta conforme a sua variação altimétrica, configurando o clima local. Seguindo o mesmo raciocínio, a inclinação e a orientação das vertentes do relevo local também influencia na distribuição da radiação solar direta. Assim, uma vertente inclinada e orientada para o norte recebe fluxo radiativo mais intenso do que as áreas com mesma inclinação posicionadas para o sul em regiões subtropicais do Hemisfério Sul. Pode-se dizer que no Hemisfério Sul, as vertentes expostas às orientações norte, noroeste, nordeste, oeste e leste recebem mais luminosidade do que as voltadas para o quadrante sul. Neste caso, as áreas expostas para as primeiras orientações citadas são mais valorizadas para a construção de edificações, como também na agricultura (GEIGER, 1990; MENDONÇA, 1995).

Ao estudar o clima da cidade, Monteiro (1976) propôs a definição de Sistema de Clima Urbano (SCU), sendo considerado como um sistema aberto com intensa troca de matéria e energia entre os ambientes urbanos e o meio que estão inseridos. A estrutura do SCU é definida a partir da conexão de suas partes (compartimentação ecológica, morfológica, funcional e urbana). Neste sentido, a forma urbana, a densidade de ocupação, a verticalização e a retirada da cobertura vegetal altera os fluxos normais de absorção, reflexão e armazenamento de energia, modificando o ritmo de ganho e perda de energia, gerando as anomalias térmicas (ilhas de calor).

Na perspectiva de estudos do SCU, o autor sugeriu três subsistemas: o termodinâmico (temperatura do ar e conforto térmico), o físico-químico (poluição e qualidade do ar) e o hidrometeorológico (impactos pluviais). Sendo que, conforme Mendonça (2015) os dois primeiros foram mais abordados em estudos realizados no Brasil, pois a temperatura do ar nas cidades, ilhas de calor e desconforto térmico se intensificam com a urbanização tropical.

Oke (1988) também relata que a urbanização provoca mudanças na superfície natural e nas propriedades atmosféricas da região. O aumento de áreas construídas implica em solos cada vez mais impermeabilizados e os materiais urbanos fazem com que o espaço em si armazene mais calor. Dousset e Gourmen (2003) e Gartland (2010) destacam que as interações entre a atmosfera e a superfície sofrem grandes alterações em áreas urbanas, pois ocorre a diminuição da reflexão solar incidente, aumento da capacidade de absorção e por consequência armazenamento de energia por mais tempo. De acordo com Lombardo (1985) e Mendonça (2003) o aumento da temperatura em áreas urbanas se deve ao desenvolvimento das atividades humanas, como por exemplo adensamento das edificações, diminuição da cobertura vegetal, concentração de veículos e indústrias, lançamentos de gases na atmosfera, dentre outros. Por apresentarem maior número de edificações as áreas centrais das cidades são mais quentes e menos ventiladas do que a periferia, as quais muitas vezes apresentam maior presença de vegetação (LOMBARDO, 1985; SPIRN, 1995).

I.4.2 Aspectos das ilhas de calor urbanas

As áreas urbanas contribuem para as mudanças no balanço de energia e assim geram bolsões de ar sobre essas áreas. Esse fenômeno pode ser denominado como ilha de calor (LOMBARDO, 1985). Dan *et al.* (2010) definem ilha de calor como o fenômeno que ocorre quando a temperatura urbana é maior do que a temperatura encontrada em ambientes naturais ou rurais vizinhos. Segundo Oke (1987) a intensidade da ilha de calor depende das características locais urbanas e meteorológicas. Douglas (1983) salienta que a forma da utilização do solo está diretamente ligada com a formação de ilhas de calor. Em 1843 Howard já descrevia as diferenças entre as temperaturas na cidade de Londres a partir de dados observados desde 1811. Com o aumento das atividades industriais e expansão de áreas construídas as mudanças das temperaturas acabaram despertando diversas pesquisas em ambientes urbanos. A exemplo o estudo de Lombardo (1985) na cidade de São Paulo que identificou diferenças nas temperaturas entre as regiões leste, sudoeste e centro.

Estudos como os de Oke (1978) e de Hung et al. (2006) destacam que nas áreas urbanas a temperatura do ar é mais elevada do que nas áreas rurais independente da zona climática. As diferenças de temperatura entre as áreas centrais e periféricas ocasionam diferenças de pressão entre as regiões mais densamente urbanizadas (maior temperatura) e a periferia (menor temperatura). Em virtude disso, existe um aumento de temperatura do ar da periferia às áreas centrais, determinando alterações na umidade do ar e precipitação. Em contrapartida, algumas áreas podem apresentar temperaturas mais amenas do que as demais, as quais são denominadas por Oke (1982) como ilhas de frio ou de frescor localizadas, geralmente, em áreas com presença de vegetação.

A ocorrência da ilha de calor na cidade forma uma circulação do ar característica, onde o ar da região central aquece e sobe e o ar da periferia converge para o centro encontrando a ilha de calor formando um domo de poluição sobre a cidade. O ar que sai da periferia, geralmente limpo e úmido, ao atravessar a cidade vai adquirindo os poluentes do meio e chega ao centro carregado desses poluentes (MARCUS E DETWYLER, 1972). Alguns fatores que contribuem para a formação de ilhas de calor são: a capacidade térmica das superfícies urbanas; devido a secura das superfícies urbanas pouca energia é utilizada para a evaporação e assim a maior parte de energia é usada para aquecer o ar; emissão de calor pelas indústrias, trânsito, edifícios. Pode-se dizer que a formação de ilhas de calor está relacionada com a disponibilidade de novos materiais urbanos que absorvem e conservam o calor vindo da radiação solar (OKE, 1973; AYOADE, 1998; GARTLAND, 2010).

González *et al.* (2006) definem a ilha de calor urbana (*urban heat island*) como um domo de altas temperaturas observadas nos centros urbanos quando comparadas com as temperaturas relativamente baixas das áreas rurais (Figura 4). Os contrastes de temperatura são maiores em condições de céu limpo e tendem a diminuir em condições nebulosas e ventosas. Os autores também apontam a substituição da vegetação natural por materiais sintéticos como causadores das ilhas de calor. As mudanças nas temperaturas ainda são observadas nas primeiras horas da noite quando a energia armazenada durante o dia é liberada sobre a atmosfera das cidades.

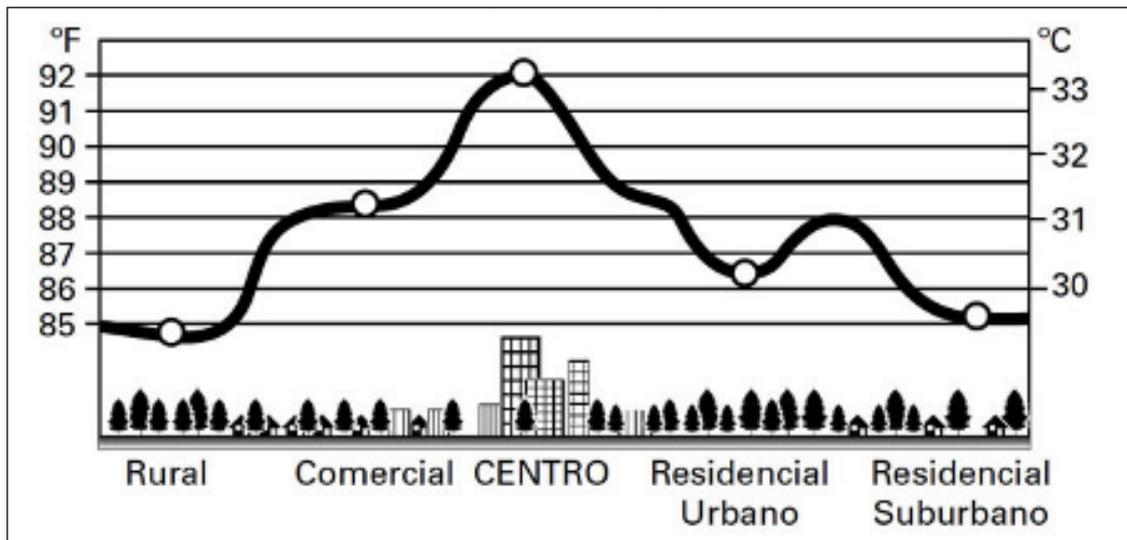


Figura 4 - Perfil da ilha de calor urbana.
Fonte: <https://www.epa.gov/heat-islands>

A ilha de calor urbana é definida por Gartland (2010) como um “oásis inverso”, onde a temperatura do ar e de superfície são mais quentes do que em áreas circundantes. A autora reafirma que o motivo dessas ilhas de calor se formarem em espaços urbanos é devido ao tipo de material que as cidades são construídas. Assim, Oke (1987) declara que a intensidade da ilha do calor resulta das características locais como cobertura de superfície e aspectos meteorológicos, variando no tempo e no espaço, com a magnitude definida pela diferença de temperatura entre o meio urbano e o rural (ΔT_{u-r}). Desta forma, o tipo da cobertura do solo determina a uniformidade da temperatura na ilha de calor e principalmente na região do platô (Figura 5) os parques contribuem para diminuir a temperatura, enquanto os usos residencial, comercial e industrial determinam temperaturas mais elevadas.

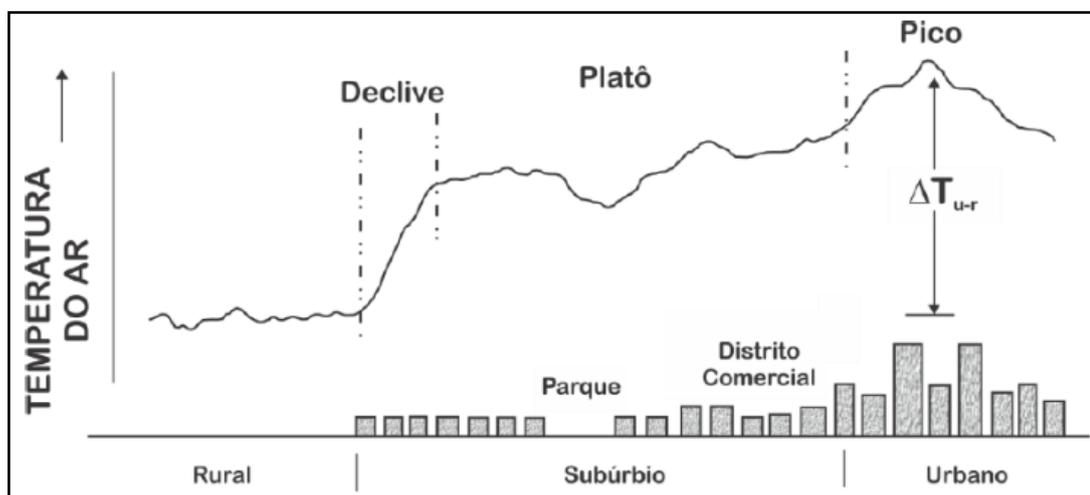


Figura 5 - Configuração de um transecto típico de uma ilha de calor urbana.
Fonte: Oke, 1987.

Estudos apontam que a diferença entre a temperatura em áreas urbanizadas e as rurais é mais acentuada no período da noite, principalmente em condições atmosféricas de céu limpo. Neste caso, no período da noite, as áreas rurais perdem calor rapidamente. Já as superfícies construídas esfriam com menor velocidade, pois durante o dia absorveu mais calor e a irradiação foi obstruída pelas paredes dos edifícios. No período da manhã as diferenças já são menores ou até inexistentes e no período da tarde começam a se acentuar (OKE, 1987; SPIRN, 1995; GARTLAND, 2010). García (1996) classificou as ilhas de calor de acordo com 4 magnitudes: fraca, média, forte e muito forte. As diferenças térmicas de 0°C a 2°C formam ilhas de calor de fraca magnitude, o intervalo de 2°C a 4°C de média magnitude, os valores entre 4°C a 6°C de forte magnitude e diferenças superiores a 6°C são consideradas de magnitude muito forte.

As temperaturas elevadas das ilhas de calor acabam prejudicando o conforto térmico da população, acarretando problemas de saúde e no desenvolvimento das atividades diárias. As pessoas idosas que apresentam problemas respiratórios, cardíacos e doenças como diabetes são as que mais sofrem com o excesso de calor (SPIRN, 1995, ANDRADE, 2005, SOUZA et al., 2010, SILVA et al., 2014). Assim, o conforto térmico é estabelecido a partir da troca de calor entre o corpo humano e o meio ambiente, e a execução das atividades é otimizada a partir de condições ambientais favoráveis que não propiciem o desconforto térmico (MONTEIRO E ALUCCI, 2007). Neste sentido, Nucci. (2008) defende que nos ambientes construídos as áreas de cobertura vegetal constituem um importante indicador de sustentabilidade pois garantem áreas permeáveis, reduzem a poluição atmosférica, contribuem para a regularização do microclima urbano, aumentam a circulação do ar e contribuem para o conforto térmico da população.

Diante desta abordagem, Tian et al. (2011) reafirmam que a disponibilização de espaços verdes no meio urbano é de suma importância, destacando que estes espaços não devem ser dispostos de forma fragmentada. O que vai ao encontro das declarações de Torre (2009) o qual afirma que em áreas com densa presença de árvores a temperatura difere significativamente das regiões urbanizadas sem cobertura vegetal. Assim, destaca-se a importância de posicionamentos metodológicos que visem o planejamento urbano que considere a vegetação como elemento regularizador e amenizador das temperaturas elevadas. Neste sentido, algumas situações ideais para o desenvolvimento urbano são indicadas por Sukopp e Werner (1991) e Gartland (2010): ampla conexão entre os espaços verdes do centro e periferia das cidades, implantação de zonas verdes estipulando elevado grau de conexão entre elas, valorização dos jardins, paisagismo eficiente através da utilização de árvores para sombreamento e plantas menores como arbustos e gramas para aumentar coberturas vegetadas.

Diante do exposto, é evidente a importância das pesquisas que abordam o estudo da cidade apresentando novas metodologias e análises que sirvam de auxílio para os planos de desenvolvimento do meio urbano. Quanto a isso, Gartland (2010) apresenta três métodos que podem ser utilizados para medir os efeitos da urbanização sobre os climas urbanos, dentre eles estão: estações físicas, transectos móveis e sensoriamento remoto. A identificação de ilhas de calor a partir de estações físicas consiste em comparar dados sobre as condições meteorológicas de duas ou mais localidades físicas. O método a partir de transectos móveis corresponde em percorrer um trajeto em uma área e parando em locais representativos para obter medidas utilizando, geralmente, somente um tipo de instrumento. Esses trajetos podem ser percorridos de carro, bicicleta e até mesmo de trem. Já o método a partir de dados de Sensoriamento Remoto compreende análises de temperatura de superfície com imagens a bordo de satélites e a vantagem da utilização de imagens de satélite é a possibilidade de visualizar as temperaturas em grandes áreas.

De acordo com Monteiro (1990), é importante que as análises não sejam realizadas tomando-se como base somente dados meteorológicos da rede de estações de observação, pois, muitas vezes, os instrumentos não revelam a realidade das condições urbanas por estarem instalados em áreas que contemplam condições rurais. Neste aspecto, a inclusão de dados de sensoriamento remoto proporciona análises em diferentes superfícies das cidades, já que as imagens orbitais abrangem o espaço urbano como um todo.

I.4.3 Sensoriamento remoto aplicado a estudos urbanos

De acordo com Wilson *et al.* (2003) o zoneamento urbano é uma das muitas ferramentas utilizadas por planejadores no controle do desenvolvimento das cidades. Em cada zona são impostas diferentes restrições em variáveis como altura máxima de edificações (densidade de construção), extensão de área impermeabilizada e uso do solo (tipo de atividades) assim a ordenação do solo é setorizada. Como essas variáveis influenciam os processos atmosféricos e de trocas de energia do ambiente, regimes climáticos e o sistema hidrológico superficial e subterrâneo, são também setorizados os problemas ambientais, ecológicos e sociais.

Neste sentido, as pesquisas uma vez realizadas com o apoio do sensoriamento remoto permitem a incorporação de novas visões da realidade ambiental. Segundo Novo (2008) os produtos de sensoriamento remoto fornecem dados consistentes da superfície terrestre de grande utilidade para diversas aplicações, como: urbanas, agrícolas, geológicas, ecológicas, florestais, hidrológicas. Souza (2012) afirma que os desafios do planejamento e da gestão

urbana contam com os avanços tecnológicos espaciais, como Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estas tecnologias permitem monitorar, em diferentes escalas, as mudanças no território facilitando o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento. Netzband e Jurgens (2010) destacam que as imagens de satélite são essenciais para a coleta de informações de áreas urbanas em diferentes escalas temporais, espectrais e espaciais, o que torna possível analisar as mudanças no ambiente natural causadas pelo crescimento urbano.

Albert *et al.* (2004) destacam que o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa para o monitoramento das mudanças no espaço urbano. Os autores falam também da gama de dados de média resolução da plataforma Landsat 5 (TM) os quais podem ser utilizados em ciências exatas e sociais para a quantificação da paisagem urbana. No entanto, Small (2002) alerta para a dificuldade de trabalhar com áreas urbanas utilizando imagens de média resolução espacial, isto se deve a heterogeneidade das superfícies urbanas (concreto, asfalto, árvores, telhas, metal, dentre outros). Neste aspecto, diversas técnicas e estudos foram desenvolvidos para melhorar a precisão na caracterização dos tipos de cobertura da terra no espaço urbano, como por exemplo classificação híbrida (Albert *et al.*, 2004), análise de pixel mistura (SMALL, 2002; MICHISHITA, 2012), redes neurais artificiais (KÍNOVÁ, 2015), e índices radiométricos para áreas construídas (ZHA, 2003; XU, 2007). Souza (2012) destaca que o uso de técnicas híbrida (automática e analógica) é possível classificar com maior precisão as manchas urbanas, destacando que o conhecimento da área de estudo é muito importante para realização deste procedimento.

A média resolução espacial das imagens disponíveis para observação da terra podem até representar certa dificuldade quanto ao estudo das superfícies heterogêneas do meio urbano, no entanto, Voogt e Oke (2003) destacam que as características multiespectrais desses produtos apresentam grandes vantagens. Neste caso, a disponibilidade de informações sobre a cobertura do solo (bandas espectro refletido) e características térmicas (bandas termais) tomadas ao mesmo tempo possibilitam as análises das relações entre cobertura e clima da cidade, superando a questão da média resolução. Neste sentido, é possível adquirir produtos com um amplo arquivo histórico de imagens, como é o caso do programa Landsat.

Considerando os últimos trinta anos, pode-se dizer que o programa Landsat apresenta um expressivo acervo de imagens, principalmente das missões Landsat 5 com o sensor *Thematic Mapper* (TM) e Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+). Desde 2013, já é possível contar com os produtos da plataforma Landsat 8 o qual disponibiliza imagens multiespectrais adquiridas a partir dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (Quadro 1). A missão tem como principal objetivo dar continuidade às

missões 5 e 7, disponibilizando imagens do visível e infravermelho com alta qualidade em termos de geometria de aquisição, calibração e características espectrais permitindo a comparação e detecção de mudanças globais, regionais e locais (USGS 2018, LANDSAT 8 USER HANDBOOK, 2016).

Características dos produtos Landsat 8 sensores OLI* e TIRS**			
Nº da banda	Nome	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial
Band 1	Coastal/Aerosol	0,435 – 0,451	30 m
Band 2	Blue	0,452 – 0,512	
Band 3	Green	0,533 – 0,590	
Band 4	Red	0,636 – 0,673	
Band 5	NIR	0,851 – 0,879	
Band 6	SWIR 1	1,566 – 1,651	
Band 7	SWIR 2	2,107 – 2,294	
Band 9	Cirrus	1,363 – 1,384	
Band 8	Pan	0,503 – 0,676	15 m
Band 10	TIR 1	10,60 – 11,19	100 m/ resampled to 30 m
Band 11	TIR 2	11,50 – 12,51	

Quadro 1 - Características das bandas Landsat 8. Fonte: USGS, 2018 e Landsat 8 User Handbook, 2016. *Bandas 1 a 9; ** Bandas 10 e 11.

Aliado aos produtos Landsat 8 existem as imagens do satélite Sentinel – 2ª as quais apresentam melhor resolução espacial (10 m) para bandas do visível e infravermelho próximo (Quadro 2), assim possibilitam a identificação mais detalhada dos tipos de cobertura urbana. Os produtos Sentinel são disponibilizados pela ESA no nível de processamento 1-C, o que significa imagens de reflectância no topo da atmosfera (TOA). As imagens podem ser convertidas para reflectância de superfície (BOA) a partir da ferramenta SNAP/SENT2COR desenvolvida pela própria agência para processamento das imagens Sentinel. Um dos principais objetivos da missão é a aquisição sistemática global de imagens multiespectrais de alta resolução aliada a maior frequência de revisita, contribuindo para o monitoramento, gerenciamento e segurança (ESA, SENTINEL USER HANDBOOK, 2015).

Características dos produtos Sentinel - 2A			
Nº da banda	Nome	Comprimento de onda central (nm)	Resolução espacial
B02	Blue	490	10 m
B03	Green	56	
B04	Red	665	
B08	NIR	842	
B05	Red Edge 1	705	20 m
B6	Red Edge 2	740	
B07	Red Edge 3	783	
B08A	Red Edge 4	865	
B11	SWIR 1	1610	
B12	SWIR 2	2190	
B01	Aerossol	443	60 m
B09	Water Vapor	940	
B10	Cirrus	1375	

Quadro 2 - Características das bandas Sentinel 2A. Fonte: ESA, Sentinel User Handbook, 2015.

Os estudos relacionados à análise e monitoramento de áreas urbanas quanto ao uso e cobertura e informações sobre o campo térmico são tão importantes quanto a análise de relevo no qual a cidade está inserida, destacando a informações sobre altimetria, declividade e orientações das vertentes como fatores que influenciam na valorização do solo urbano bem como na variação térmica do ar e dos diferentes materiais urbanos. Neste caso, os produtos de sensoriamento remoto também podem auxiliar a partir de modelos digitais de elevação (MDE), como é o caso do MDE SRTM. A missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi desenvolvida no ano de 2000 onde o objetivo foi a formação de um modelo de elevação mundial a partir do processamento dos dados coletados, compreendendo 80% de área do planeta entre as latitudes 60°N e 56°S (USGS, 2018).

A partir do processamento digital de imagens orbitais é possível extrair informações de diferentes áreas na superfície terrestre. Para tanto, o conhecimento da resposta espectral dos diversos alvos existentes nas imagens (solo, vegetação, área urbana, água) é um fator de suma importância. Em relação a característica espectral de áreas urbanas, pode-se dizer que estas não apresentam um comportamento espectral padrão devido a sua heterogeneidade. Assim, um pixel pode representar várias coberturas, o que dificulta uma classificação intraurbana. Estudos que envolvem área urbana e sensoriamento remoto dependem da resolução espacial das imagens orbitais. As imagens de média resolução espacial (10-50 m) podem ser utilizadas em estudos que visam a análise da mancha urbana. Já trabalhos que têm por objetivo identificar o espaço intraurbano devem considerar imagens de maior resolução espacial (SOUZA, 2012).

A cobertura referente à área urbana, geralmente, aparece na cor cinza-claro nas imagens em composição colorida verdadeira (bandas do visível), porque as superfícies urbanas basicamente são

compostas por vias de asfalto e concreto, telhas, solo exposto e estacionamentos. Estes materiais refletem altas parcelas do fluxo radiante incidente do verde, vermelho e infravermelho próximo, contrastando com a vegetação que, geralmente, aparece em vermelho, verde ou magenta dependendo da combinação das bandas na composição falsa-cor (JENSEN, 2009).

Em alguns casos o solo apresenta uma resposta espectral semelhante à área urbana. Desta forma, uma alternativa para superar este fato é uma análise visual da imagem ou análise qualitativa. A análise visual pode contar com técnicas de interpretação que permitem abordar, além de dados espectrais, elementos como textura, localização, análise de contexto, brilho, como também o conhecimento que o analista tem da área de estudo. O ideal é selecionar as faixas espectrais onde a área urbana apresente maior contraste em relação às outras coberturas, a exemplo a faixa espectral do vermelho (visível) e infravermelho próximo.

Outra opção, é a escolha por imagens no período úmido, nesta época a reflectância do solo e vegetação é menor o que aumenta o contraste entre estas coberturas e a área urbana (JENSEN, 2009; SOUZA, 2012). Segundo Jensen (2005) muitas vezes a interpretação visual da estrutura urbana em imagens orbitais pode ser mais eficiente do que a classificação automática e semiautomática. Assim, o analista é capaz de identificar o espaço físico urbano e a localização de forma contextual.

Além de estudos relacionados à análise e monitoramento de áreas urbanas que consideram o espectro refletido, estudos relacionados ao clima urbano também podem ser abordados a partir do sensoriamento remoto. Ao considerar a resposta espectral de áreas urbanas no espectro emitido pode-se trabalhar com dados do infravermelho termal para determinar as variações das temperaturas nessas áreas.

Diversos trabalhos nesta abordagem podem ser citados como: Chen *et al.* (2006) realizaram uma análise da relação entre ilhas de calor urbanas e as mudanças no uso e cobertura do espaço urbano; Liu e Zhang (2011) analisaram ilhas de calor urbanas a partir de dados Landsat e Aster; Deng e Wu (2013) que analisaram os impactos das composições biofísicas urbanas em ilhas de calor urbanas utilizando dados da plataforma Landsat 7 (ETM+). Trabalhos nacionais também podem ser citados: Costa *et al.* (2010) utilizaram imagens do infravermelho termal para identificar ilhas de calor na área urbana da Ilha de Solteira – SP; Lima e Amorim (2011) utilizaram dados do infravermelho termal, NDVI e dados de campos para realizar uma análise da qualidade ambiental urbana em Nova Andradina – MS; Barros e Lombardo (2013) realizaram o zoneamento climático urbano de Recife a partir de dados da plataforma Landsat 5 (TM).

I.4.4 Infravermelho termal para a análise da temperatura em áreas urbanas

Ao analisar uma imagem obtida na faixa do infravermelho termal o analista deve levar em consideração não mais a resposta espectral dos alvos no espectro refletido, mas sim sua variação no espectro emitido. Todos os corpos que apresentam temperatura acima do zero absoluto (0 K ou -273,15 °C) emitem radiação termal a qual é o resultado da mudança de estado de energia das partículas da matéria a partir do seu movimento aleatório das moléculas (calor cinético). A temperatura cinética verdadeira (T_{Kin}) pode ser medida *in situ* a partir de um termômetro. A concentração da quantidade de fluxo radiante emitido por um objeto pode ser chamada de temperatura radiante (T_{rad}). Na maioria das vezes, existe uma alta correlação positiva entre a temperatura cinética e a temperatura radiante, sendo que os valores de T_{Kin} são um pouco maiores que a T_{rad} devido à propriedade termal chamada de emissividade. Os sistemas de sensoriamento remoto registram a temperatura radiante de objetos da superfície terrestre e não a temperatura real e os dados são geralmente registrados na região de 10,5 a 12,5 μm (SABINS, 1986; JENSEN, 2009).

O físico alemão Max Planck desenvolveu a teoria que explica o espectro da radiação termal, desenvolvendo a equação de emissão termal que fornece a emitância ou exitância espectral radiante ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) do corpo negro para dada temperatura e diferentes comprimentos de onda (Equação 1). A quantidade de energia que deixa um material é descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann a qual relaciona a quantidade de energia emitida (exitância radiante - M_b) por um corpo negro e a temperatura desse corpo. Um corpo negro caracteriza-se por absorver e emitir toda a radiação incidente em iguais proporções nos comprimentos de onda. Assim, a Lei de Stefan-Boltzmann afirma que a exitância radiante espectral total que deixa um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura (Equação 2) (JENSEN, 2009; LORENZZETTI, 2015).

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \times 10^{-6}}{\lambda^5 [e^{(hc/\lambda kT)} - 1]} \quad \text{Equação 1}$$

$$M_b = \sigma T^4 \quad \text{Equação 2}$$

Onde k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ Jk}^{-1}$), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$), c é a velocidade da luz no vácuo (ms^{-1}), λ é o comprimento de onda em metros, T é a temperatura em graus Kelvin.

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann no valor de $5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ e T é a temperatura em graus Kelvin.

O pico de emissão de um corpo negro ocorre em determinado comprimento de onda λ , e a relação entre a sua temperatura em graus Kelvin e seu pico de emissão espectral é descrita pela Lei do deslocamento de Wien (Equação 3). A partir desta equação é possível afirmar que a medida que aumenta a temperatura de um corpo o seu pico de emissão desloca-se para os menores comprimentos de onda. Como o corpo negro é um radiador perfeito ele possui uma emissividade igual a 1. A emissividade (ϵ) pode ser descrita como a relação entre a radiação real emitida por um objeto no mundo real (M_r) e um corpo negro a mesma temperatura cinética (M_b) (Equação 4). Ao observar objetos do mundo real pode-se dizer que estes não são radiadores como um corpo negro, mas sim radiadores seletivos. Os alvos como vegetação, solo e água emitem maiores ou menores quantidades de energia em diferentes comprimentos de onda. Desta forma, a partir do conhecimento da emissividade dos materiais reais é possível estimar as suas temperaturas cinéticas (Equação 5) (SABINS, 1986; JENSEN, 2009; LORENZZETTI, 2015).

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{k}{T} \quad \text{Equação 3}$$

Onde k é uma constante igual a $2,898 \mu\text{m K}$.

$$\epsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad \text{Equação 4}$$

$$T_{\text{rad}} = \epsilon^{1/4} T_{\text{Kin}} \quad \text{Equação 5}$$

Pode-se dizer que a emissividade traduz a capacidade de um material em transformar o seu calor em radiação, ou seja, de emitir radiação termal (JENSEN, 2009; LORENZZETTI, 2010). Neste sentido, um corpo negro ideal emite toda energia que absorve, apresentando a emissividade igual a 1. No entanto, os materiais da superfície terrestre não apresentam emissividade igual a 1, desta forma, seus valores variam no intervalo de 0 a 1. Na tabela 1 é possível verificar a emissividade de diferentes superfícies na faixa de 8 a $14 \mu\text{m}$.

Tabela 1 - Emissividade de diferentes materiais na faixa de 8 a 14 μm .

Material	Emissividade
Concreto	0,71 – 0,90
Asfalto	0,95
Cimento/pedra	0,97
Solo siltoso seco	0,92
Solo siltoso úmido	0,95
Solo arenoso	0,90
Basalto	0,95
Tijolo/vermelho e áspero	0,93
Vegetação dossel fechado	0,98
Vegetação dossel aberto	0,96
Gramma	0,97
Madeira	0,90
Água	0,92 – 0,98

Fonte: Jensen, 2009. Adaptado Trindade, 2018.

Neste sentido, Voogt e Oke (2003) afirmam que as imagens do infravermelho termal surgiram como produtos excelentes para observações e análise da temperatura e ilhas de calor urbano, permitindo estabelecer as relações térmicas de superfície com dados de temperatura do ar levantados em campo. No entanto, as imagens adquiridas, no caso dos produtos Landsat, disponibilizam a temperatura de brilho dos materiais e não a temperatura de superfície propriamente dita. É neste aspecto que surgem alguns impasses quanto à conversão das imagens termais, já que diversas metodologias consideram os aspectos da emissividade para correção (NICHOL, 1994; COLLISCHONN, 1998; VALOR E CASELLES, 1996; ZHANG et al. 2006, STEINKE et al., 2010), outras abordam as correções da emissividade dos alvos e correções atmosféricas (BERK et al. 1989; Qin et al. 2001; SOBRINO et al., 2004). Como também existem trabalhos (MENDONÇA, 1995) que embasam as análises da temperatura urbana a partir dos valores de temperatura de brilho das imagens.

O cálculo da emissividade de superfície (LSE) conta com diferentes metodologias e as aplicações mais utilizadas e que, de acordo com Sobrino et al. (2004), são de fácil operação e apresentam bons resultados, são as imagens de LSE adquiridas a partir do índice de vegetação NDVI. Neste caso, diversos trabalhos apontam o cálculo de LSE com valores de NDVI (VAN DE GRIENDE E OWE, 1993; VALOR e CASELLES, 1996; ZHANG et al. 2006). Quanto aos métodos de conversão que compreendem também as correções atmosféricas, pode-se citar o *Radiative*

transfer equation (Berk et al., 1989) e *Mono-window algorithm* (Qin et al., 2001). Todas estas abordagens foram implementadas na ferramenta *Land Surface Temperature* (LST) desenvolvida por Ndossi e Avdan (2016) disponibilizada a partir do software QGIS. Os autores implementaram quatro diferentes métodos de correção de imagens termais Landsat 5, 7 e 8. Além dos métodos supracitados, também consideram *Planck Equation* (correção somente da emissividade) e *Single Channel Algorithm* (SCA). Os algoritmos foram testados em 6 cenas diferentes e os melhores resultados ocorreram para as imagens corrigidas com a *Planck Equation*, com RMSE de 1,5°C nas imagens Landsat 5 e 2,07°C nas imagens Landsat 8.

Diante do exposto cabe destacar que inúmeros estudos do comportamento térmico das cidades bem como identificação de ilhas de calor já foram desenvolvidos a partir da utilização de dados do infravermelho termal. O estudo de ilhas de calor nas metrópoles de Lombardo em 1985 pode ser considerado um dos pioneiros no Brasil. Já em 1994 Quattrochi e Ridd ao analisar diferentes cidades com sistemas termais de alta resolução identificaram diferenças nas temperaturas nos variados usos do solo urbano. Os autores verificaram que as áreas comerciais apresentavam temperaturas mais altas, em seguida as áreas de serviços, transportes e indústria. As menores temperaturas foram encontradas na vegetação, água e terras agrícolas, já as áreas residenciais apresentaram temperaturas intermediárias.

Weng (2003) identificou duas grandes ilhas de calor urbanas nas regiões leste e sudoeste de Guangzhou na China ao utilizar dados termais do sensor TM do Landsat 5. No Brasil, Costa *et al.* (2010) também utilizaram o sensor TM para analisar a temperatura de superfície de Ilha Solteira em São Paulo. Os autores destacam que valores de temperatura entre 21°C e 23°C representam superfícies com a presença de vegetação. Já nas áreas com densa cobertura de edificações foram encontradas as maiores temperaturas (41°C a 44°C). Esses são alguns exemplos de como os dados termais de Sensoriamento Remoto podem auxiliar em estudos relacionados à cidade. É importante destacar que tanto os dados como *softwares* de processamento apresentaram grandes avanços nos últimos anos o que facilitou ainda mais a utilização do sensoriamento remoto em diversas áreas e diferentes análises.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE SANTA MARIA –ADESM. **Aspectos gerais de Santa Maria**. Disponível em: <<http://santamariaemdados.com.br/1-aspectos-gerais/>> Acesso em: 18 maio de 2016.
- ALBERT, M. WEEKS, R. COE, S. Urban land-cover change analysis in Central Puget Sound. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, v. 70, n. 9, p. 1043-1052, 2004.
- AMORIM, M. C.C.T. Clima urbano: concepções teóricas, metodologias, aplicações e perspectivas. **Revista Equador**, v. 4, p. 49 – 66, 2015.
- ANDRADE, H. O clima urbano- natureza, escalas de análise e aplicabilidade. Finisterra. **Revista Portuguesa de Geografia**, v. 80, p.66-91, 2005.
- AYOADE, J.O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil S.A., 1998.
- BARBARIÉ, Z.; PAVLOVIÉ, A.; NIKOLIÉ, V. Impact of emissivity and reflectivity of the object to estimate temperature using infrared thermal imaging camera. **Scientific Publications of the State University of Novi Pazar**, v. 7, P. 91-98, 2015.
- BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. Zoneamento climático urbano da cidade do Recife: uma contribuição ao planejamento urbano. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, n. 33, p. 187-197, 2013.
- BELTRÃO, R. **Cronologia histórica de Santa Maria e do extinto município de São Martinho, 1987-1930**. 2 ed. Canoas: La Salle, 1979.
- BERK, A., BERNSTEIN, L. S., & ROBERTSON, D. C. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Technical Report GL-TR-89- 0122, Geophys. Lab, Bedford, MA, 1989.
- CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P. X.; YIN, Z.Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing Environment**, v.104, p. 133-146, 2006.
- COLLISCHONN, E. **O campo térmico da região metropolitana de Porto Alegre: uma análise a partir da integração das variáveis ambientais do clima local**. Tese (doutorado) /UFSC, Florianópolis, 1998.
- COSTA, D. F. da.; SILVA, H. R.; PERES, L. de F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira – SP através da utilização de geotecnologias. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.30, n.5, p. 974-985, 2010.
- DAN, S.; XUE, W.; DAN, B.; XU, H.; HE, J. Comparison and analysis of research methods for urban heat island effect based on Landsat TM5. **Second International Conference on Geoscience and Remote Sensing - IITA**, 2010.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Ilha Térmica em Porto Alegre**. Boletim Gaúcho de Geografia, Porto Alegre: AGB-PA, n.8, p. 33-48, 1980.

DENG, C.; WU, C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach. **Remote Sensing Environment**, v.131, p. 262-274, 2013.

DOUGLAS, I. - **The urban environment**. Londres: Edward Arnold (Publishers) Ltda, 1983.

DOUSSET, B.; GOURMELON, F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.58, p. 43-54, 2003.

ESA. **Sentinel User Handbook**. 2015. Disponível em: < <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi?sessionId=CBF9FE90CE06695E73D49D98E6189695.jvm2> > Acesso: fevereiro 2018.

FOSTER, B. C. An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. **International Journal of Remote Sensing**, v., n.1, p. 139-151, 1985.

GARCÍA, F. F. **Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación**. Madrid: Editorial Síntesis, S.A., 1996. 285p

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GEIGER, R. **Manual de microclimatologia - o clima da camada de ar junto ao solo**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2a ed., 1990. 639 p.

GOBO, J. P. A. Análise do conforto térmico humano no outo-inverno em Santa Maria – RS: uma abordagem em escala local e regional. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 46, 2016.

GONZÁLES, J. E.; LUVALL, J. C.; RICKMAN, D. L.; COMARAZAMY, D.; PICON, A. J. Urban heat island. Identification and climatological analysis in a Coasyal, Tropical City: San Juan, Puerto Rico. In: Weng, Q. **Urban Remote Sensing**. Taylor & Francis Group, p. 223-252, 2010.

GUSTAVSON, T. Variation in road surface temperature due to topography and wind. **Theoretical and applied climatology**, n. 41, p. 227-236, 1990.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. San Diego, Academic Press, 1994.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência&Ambiente**, n. 38, p.43-59, 2009.

HOWARD, L. **Seven lectures on meteorology**. London: Joseph Rickerby, 1843.

HUNG, T.; UCHIHAMA, D.; OCHI, S.; YASUOKA, Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. **International Journal Earth Observation and Geoinformation**, v. 8, p. 34 – 48, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Histórico de Santa Maria.** Disponível em: <
<http://www.cidades.ibge.gov.br/painel/historico.php?lang=&codmun=431690>> Acesso em: 20
 Novembro de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: <
http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm > Acesso em: 20 Novembro de 2015.
 JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective.** 3 ed.
 Upper Saddle River, N.J: Prentice-Hall, 2005.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.**
 São José do Campos: Parêntese, 2009.

JIMÉNEZ – MUÑOZ, J.; SOBRINO, J. A.; SKOKOVIĆ, D.; MATTAR, C.; CRISTÓBAL, J.
 Land surface thermal retrieval methods from Landsat – 8 Thermal Infrared Sensor data. **IEEE
 Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 10, p. 1840 – 1843, 2014.

JÚNIOR, J. C. U.; M. C. de C. T. Reflexões acerca do Sistema Clima Urbano e sua
 aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. **Revista do
 Departamento de Geografia USP**, v. Especial, p. 160 – 173, 2016.

KÍNOVÁ, A.; DOBROVOLNY, P. A neural nets urban land cover classification: a case study
 of Brno (Czechia). **AUC Geographica**, v.50, n.2, p. 153-163, 2015.

KUMAR, K. S.; BHASKAR, P. U.; PADMAKUMARI, K. Estimation of land surface
 temperature to study urban heat island effect using Landsat ETM+ image. **International
 Journal of Engineering Science and Technology**, v.4, n.2, p. 771 - 778, 2012.

LIMA, V.; AMORIM, M. C. C. T. A utilização de informações de temperatura da superfície,
 do NDVI e de temperatura do ar na análise de qualidade ambiental urbana. In: Simpósio
 Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais...**São José dos Campos: INPE,
 2011. Artigos, p. 128-135.

LIU, L.; ZHANG, Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER
 Data: A Case Study in Hong Kong. **Remote Sensing**, v.3, p. 1535-1552, 2011.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo.** São Paulo:
 Hucitec, 1985.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de Sensoriamento Remoto.** São Paulo: Blucher,
 2015.

NETZBAND, M.; JURGES, C. Urban and suburban areas as a research topic for remote
 sensing. In: RASHED, T.; JURGES, C. Remote Sensing of Urban and Suburban Areas. New
 York: Springer, 2010.

MARCHIORI, J. N. A vegetação em Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, n. 38, p.93-112, 2009.

MARCUS, M.G.; DETWYLER, T.R. - **Urbanization and environment**. Belmont/Cal: Duxburg Press, 1972.

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

MENDONÇA, F. de A. **O Clima e o Planejamento Urbano das Cidades de Porte Médio e Pequeno**: Proposições Metodológicas para Estudo e sua Aplicação à Cidade de Londrina/PR. 1994. 322f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia FFLCH/USP, São Paulo, 1995.

MICHISHITA, R.; JIANG, Z.; XU, BING. Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p.3-18, 2012.

MONTEIRO, L.M.; ALUCCI, M.P. Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: Consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. **Ambient. Construído**, n. 7, p. 43–58, 2007.

MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **Geosul**, Florianópolis, n.9, p. 61-79, 1990.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. 1976. Tese (Livre Docência em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

NICHOL, J. E. A GIS-based approach to microclimate monitoring in Singapore's high-rise housing estates. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 60, n. 10, p. 1225 – 1232. 1994.

NDOSI, M. I.; AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008.

NUCCI, J. C. **Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília**. 2ª ed. Curitiba: O Autor, 2008.

OKE, T.R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. **Energy and Buildings**, v.11, p. 103-113, 1988.

OKE, T.R. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. **Quat. J.R. Met. Soc.** v.108, n.455, p. 1-24, 1982.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environments**, v. 7, n. 8, 769-779, 1973.

OKE, T. R **Boundary Layer Climates**. 2 nd ed. London: Ethuen & CO,1978.372p

ONU. **World Urbanization Prospects.** Disponível em: <<https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>> Acesso em: outubro 2018.

ORTIZ, G. F.; AMORIM, M.C.C.T. Temperatura da superfície da cidade de Cândido Mota-SP a partir da imagem de satélite Landsat 7. **Revista Geográfica da América Central**, v.1, p. 1-16, 2011.

PINHO, O. S.; ORGAZ, M. D. M. The urban heat island in a small city in coastal Portugal. **International Journal of Biometeorology**, v. 44, p. 198-203, 2000.

PIRES, C. A. F.; DAL'ASTA, A. P. Zoneamento geoambiental do perímetro urbano de Santa Maria – RS, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 40, p. 278-290, 2011.

QUATTROCHI, D. A.; RIDD, M. K. Measurement and analysis of thermal energy from discrete urban surfaces using remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 10, p. 1991-2022, 1994.

QIN, Z.-H.; KARNIELI, A.; BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **Int. J. Remote Sensing**, 22, 3719–3746, 2001.

RAO, P. K. Remote Sensing of urban “heat islands” from an environmental satellite. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 53, p. 647-647, 1972.

RIBEIRO, A.G. As Escalas do Clima. **Boletim de Geografia Teórica**, v.23, n.45-46, p. 288-294, 1993.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidades, tendências e tipologia.** 2011. 253f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SABINS, F. F. Jr. **Remote Sensing: principles and interpretation.** New York: W. H. Freeman and Company, 1986.

SARTORI, M.G.B. **O Vento Norte.** Santa Maria: Gráfica e Editora Palloti, 2016.

SARTORI, P. L. P. Geologia e Geomorfologia de Santa Maria. **Ciência & Ambiente.** Santa Maria, n. 38, p.19-43, 2009.

SARTORI, M. G. B. **Clima e Percepção.** 2000. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SARTORI, M. G. B. **O clima de Santa Maria, RS: do regional ao urbano.** 1979. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, 1979.

SCHNEIDER, A., FRIEDL, M. A.; MCLVER, D. K.; WOODCOCK, C.E. Mapping urban areas by fusing multiple sources of coarse resolution remotely sensed data. **Photogrammetry Engineering and Remote Sensing.** v. 69, n. 12, p. 1377-1386, 2003.

SILVA, E. N.; RIBEIRO, H.; SANTANA, P. Clima e Saúde em Contextos Urbanos: Uma Revisão da Literatura. **Biblio 3W**, Barcelona, v. 19, n.1092 p.1-27. 2014.

SMALL, C. Multitemporal analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n.3, p. 427-442, 2002.

SORRE, M. (1934): Introduction-Livre Premier: Climatophysique e Climatochimie. In PIERRY, or., *Traité de Climatologie Biologique et Médicale*. Tome I – 1-9p.

SOUZA, I. de M. e; **Sensoriamento Remoto Orbital aplicado a estudos urbanos**. São José dos Campos: INPE, 2012. Disponível em: < <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BEFCJH>> Acesso em 20 de setembro de 2015.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 434 – 440, 2004.

SOUZA, A. de; PAVÃO, H. G.; LASTORIA, S. G. G.; CAVAZZANA, G. H.; PARANHOS FILHO, A. C. Modelo de Thom para o zoneamento bioclimático de Mato Grosso do Sul. **Revista de Geografia Norte Grande**, v.46, p.137-147, 2010.

SPIRN, A. W. **O Jardim de Granito: A natureza do Desenho da Cidade**. São Paulo: Editora da USP, 1995.

STEINKE, E. T.; STEINKE, V. A.; SAITO, C. H. Estimativa da temperatura de superfície em áreas urbanas em processo de consolidação: reflexões e experimento em Planaltina-DF. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, p. 37-56, 2010.

STREUTKER, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.13, p. 2595-2608, 2002.

SUKOPP, H.; WERNER, P. Naturaleza en las ciudades. Desarrollo de flora y fauna en áreas urbanas. **Monografias de la Secretaria de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente**. Madrid: Ministério de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 1991.

SUTILI, F. J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. Hidrologia de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**. Santa Maria, n. 38, p.19-43, 2009.

TIAN, Y.; JIM, C.Y.; TAO, Y.; SHI, T. Landscape ecological assessment of green space fragmentation in Hong Kong. **Urban Forestry & Urban Greening. Elsevier GmbH**, v. 10, p.79-86, 2010.

TORRE, J. M. O. de la. **Ciudad, vegetacion e impacto climático: El confort en los espacios urbanos**. Barcelona: Erasmus Ediciones, 2009.

USGS. **Landsat 8 OLI e TIRS**. Disponível em: <<https://lta.cr.usgs.gov/L8>> Acesso: setembro de 2018.

USGS. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Disponível em: <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>> Acesso fevereiro 2018.

VALOR, E.; CASELES, V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South Americas áreas. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 167 – 184, 1996.

VAN de GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119 – 1131, 1993.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal Remote Sensing of urban climates. **Remote Sensing of environment**, v. 86, n.3, p.371-384, 2003.

WANG, F.; QIN, Z.; SONG, C.; TU, L.; KARNIELI, A.; ZHAO, S. An improved Mono-Window Algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. **Remote Sensing**, 7, p. 4268 – 4289, 2015.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island. Effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n.5, p. 555-566, 2003.

WILSON, J. S.; CLAY, M.; MARTIN, E.; STUCKEY, D.; VEDDER-RISH, K. Evaluating environmental influences of zonin in urban ecosystems with remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.86, p. 303-321, 2003.

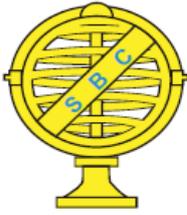
XU, H. Extraction of urban built-up Land features form Landsat imagery a thematic-oriented index combination technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 73, n. 12, p. 1381- 1391, 2007.

ZANATTA, R. N. A (Re) **Configuração do Espaço Urbano de Santa Maria-Rs sob a Ótica Territorial e das Políticas Habitacionais**. Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, 2011.

ZHA, Y. J. Gao, J.; Ni, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**. v. 24, n.3, p.583-594, 2003.

ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Comput. Geosci**. v. 32, 1796–1805, 2006.

**CAPÍTULO II. UTILIZAÇÃO DO INFRAVERMELHO TERMAL NA ANÁLISE
ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E ILHAS DE CALOR
URBANAS**



Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/4, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais: 837-855
 Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
 ISSN: 1808-0936

UTILIZAÇÃO DO INFRAVERMELHO TERMAL NA ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E ILHAS DE CALOR URBANAS

*Usage of Thermal Infrared Sensing in the Spatio-Temporal Analysis of Surface
 Temperature and Urban Heat Islands*

**Patricia Michele Pereira Trindade¹, Dejanira Luderitz Saldanha¹,
 & Waterloo Pereira Filho²**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
 Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP: 90501-970, Porto Alegre - RS, Brasil
 patriciatrindade.sr@gmail.com,dejanira.saldanha@ufrgs.br

²Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
 Av. Roraima, 1000 - CEP: 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil
 waterloopf@gmail.com

Recebido em 17 de Fevereiro, 2017/ Aceito em 29 de Abril, 2017
Received on February 17, 2017/ Accepted on April 29, 2017

RESUMO

Diante do cenário atual de expansão urbana cada vez mais crescente, surgem inúmeras preocupações sobre os diversos impactos que a substituição do meio natural por áreas construídas pode acarretar. Um dos assuntos mais discutidos na atualidade é a questão do aquecimento global. Assim, a comunidade científica lança mão das mais variadas técnicas para estudar o ambiente urbano. Os dados captados por sensoriamento remoto na região do infravermelho termal possibilitam a realização de estudos da temperatura de diferentes coberturas da terra. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar as variações na temperatura de superfície e existência de ilhas de calor urbanas na cidade de Santa Maria- RS, considerando um período de vinte anos. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite dos sensores TM a bordo do satélite Landsat 5 e OLI e TIRS do satélite Landsat 8. O critério para seleção das imagens foi a ausência de nuvens e ruídos que pudessem comprometer as análises. Assim, realizou-se uma análise de uma série temporal considerando as quatro estações do ano para o período de 1994 a 2014. Os procedimentos metodológicos seguiram basicamente três etapas. Primeiramente, foram realizadas classificações supervisionadas a partir do algoritmo *MaxVer*, para estabelecer a expansão urbana da área de estudo. No segundo momento, as imagens de temperatura aparente foram convertidas para temperatura de superfície pela ferramenta *Land Surface Temperature (LST)* disponível no *software QGIS*. A terceira etapa consistiu em estabelecer uma metodologia que possibilitasse a identificação de ilhas de calor urbanas em todas as estações do ano. Assim, realizou-se a subtração da temperatura média de cada imagem com auxílio da ferramenta *band math* do *Envi*. Desta forma, foi possível verificar a diferença entre a temperatura de cada pixel e a temperatura média de sua respectiva imagem. Todas as análises das imagens foram acompanhadas com a verificação das condições meteorológicas da cidade a partir dos dados disponíveis na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir da análise dos dados foi possível constatar aumento das áreas com temperaturas de superfície mais elevadas, o que pode ser

justificado pelo incremento das áreas construídas na cidade, já que a taxa de crescimento de 1994 para 2014 foi de 70%. A ilhas de calor urbanas foram identificadas em todas as estações, porém as de maior intensidade (6°C superiores à média), foram encontradas para as imagens do verão e primavera. Um dos principais resultados alcançados foi a identificação de áreas com temperaturas mais elevadas, como as regiões leste, centro e oeste da cidade. As áreas vegetadas apresentaram temperaturas mais brandas, assim se caracterizaram como possível solução para amenizar regiões muito quentes. Sendo que, por mais que as imagens utilizadas sejam de média resolução espacial elas são empregadas em diversos estudos urbanos, como é o caso da presente pesquisa, pois além da distribuição ser gratuita as imagens Landsat possuem um grande acervo histórico e atualmente apresenta resolução temporal de 16 dias. Neste sentido, conclui-se que os produtos e as técnicas de sensoriamento remoto permitiram a geração de informações que podem ser usadas por gestores públicos no planejamento territorial e assim mitigar os problemas urbanos.

Palavras-chave: Área Urbana, Ilha de Calor, Sensoriamento Remoto, Imagens de Satélite.

ABSTRACT

Given the contemporary landscape of ever-growing urban expansion, countless concerns show up in regard to the diverse impacts that the substitution of the natural environment for constructed surfaces can bring about. One of the subjects most discussed nowadays is the question of global warming. Thus, the scientific community resorts to varied techniques in order to study the urban environment. The data obtained by remote sensing from the thermal infrared region allows for the undertaking of studies of temperature on different surfaces of the earth. In this context, the objective of this research was to analyze the variations in surface temperature and the existence of urban heat islands in the city of Santa Maria, RS, Brazil, considering a span of twenty years. For this purpose, satellite images from the TM sensors aboard the Landsat 5 satellite and from the OLI and TIRS sensors of the Landsat 8 satellite were used. The criterion for the selection of images was the absence of clouds and noise that could compromise the analyses. Thus, a time series analysis considering the four seasons of the year during the period from 1994 to 2014 was performed. The methodological proceedings followed three steps. Firstly, classifications supervised by the MaxVer algorithm were performed in order to establish the urban expansion of the study area. Secondly, the images of apparent temperature were converted to surface temperature with the help of the Land Surface Temperature (LST) tool, available in the software QGIS. Thirdly, a methodology was established that could enable the identification of urban heat islands throughout all the seasons of the year. Thus, the average temperature was subtracted from each image with the help of the band math tool in Envi. In this way, the difference between the temperature of each pixel and the average temperature of its respective image could be verified. All the image analyses were accompanied by the verification of the meteorological conditions of the city through the data available in the meteorological station of the National Institute of Meteorology (*Instituto Nacional de Meteorologia; INMET*). From the data analysis, the increase of areas with more elevated surface temperature could be verified, which can be justified by the development of constructed areas in the city, since the growth rate from 1994 to 2014 was 70%. The urban heat islands were identified throughout all the seasons, however, the ones with the most intensity (6°C, or 10, 8 °F, above average) were found in the images of summer and spring. One of the main results achieved was the identification of areas with more elevated temperatures, such as the eastern, central and western regions of the city. The vegetated areas showed milder temperature, thus they were characterized as possible solutions for the cooling of hotter regions. Despite being of low spatial resolution, the images used can be employed in a variety of urban studies, as is the case with the present research, because beyond their free distribution, the Landsat images have an ample historical collection, and currently present a temporal resolution of 16 days. In conclusion, the products and techniques of Remote Sensing allow for the generation of information can be used by public managers in territorial planning and, thus, mitigate urban problems.

Keywords: Urban Area, Heat Islands, Remote Sensing, Satellite Images.

1. INTRODUÇÃO

Em 1985, já era constatado que os municípios brasileiros assistiam um crescente processo de urbanização com a concentração de pessoas em áreas urbanas, conforme trabalho realizado por Lombardo (1985). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o censo demográfico de 2010 constatou

que 84% da população brasileira reside em áreas urbanas. A transformação do meio natural em ambiente urbanizado contribui para a artificialização do espaço bem como mudanças na qualidade ambiental. Conforme Ortiz e Amorim (2011), a falta de planejamento urbano acaba contribuindo para problemas ambientais nas cidades a partir das mudanças na atmosfera

local com a poluição do ar e aumento das temperaturas.

Dentre os impactos gerados a partir da ocupação desordenada do espaço urbano pode-se citar as alterações no clima urbano. A substituição da cobertura natural pelo incremento de área edificada contribui para o aumento da temperatura do ar e de superfície em relação ao seu ambiente circunvizinho não urbanizado. Assim, surge o fenômeno denominado “ilha de calor urbana” caracterizado pelo elevado aquecimento térmico das cidades, principalmente áreas centrais, em comparação aos ambientes naturais ou rurais. O fenômeno é formado nessas áreas porque os materiais de construção absorvem e retêm mais radiação solar do que áreas naturais (OKE, 1973; GARTLAND, 2010).

Segundo Nucci (2008) e Chen *et al.* (2006), uma das principais consequências das ilhas de calor é a modificação da circulação atmosférica local e como resultado observa-se maior concentração de poluentes em seu interior bem como temperaturas mais elevadas. Estudos como de Silva *et al.* (2014) apontam que as ilhas de calor urbanas proporcionam o desconforto térmico e podem ser responsáveis pelo agravamento de problemas respiratórios e cardiovasculares.

Diante disto, cabe destacar que a qualidade do ambiente urbano é um importante campo de pesquisa, sendo que cabem aos pesquisadores o desenvolvimento de trabalhos que busquem identificar os problemas nos mais variados espaços urbanos para que, de alguma forma, se possa mitigar os problemas existentes e prevenir os futuros. Neste contexto, apresenta-se o objetivo deste trabalho que foi analisar as variações na temperatura de superfície e existência de ilhas de calor urbanas na cidade de Santa Maria (RS) considerando o período de 1994 a 2014.

Gartland (2010) destaca alguns métodos para medir os efeitos da urbanização no clima urbano, dentre eles estão: Estações fixas; Transectos móveis e sensoriamento remoto. Os dois primeiros métodos são utilizados para monitorar a temperatura do ar. Já o Sensoriamento Remoto pode ser utilizado para verificar outras características do meio urbano, como tipos de cobertura e temperatura

de superfície a partir de imagens de satélite do espectro refletido e do emitido. A autora ainda destaca que a vantagem de utilizar o sensoriamento remoto é a possibilidade de visualizar as temperaturas em grandes áreas. Na presente pesquisa serão utilizados dados de sensoriamento remoto para analisar as características termais da área de estudo.

Mudanças no uso e cobertura da terra, expansão urbana e temperatura de superfície podem ser analisados a partir das imagens de satélites. Com o processamento digital de imagens é possível identificar ilhas de calor urbanas através de produtos que compreendem a faixa do infravermelho termal. O estudo de áreas urbanas a partir de imagens do infravermelho termal foi realizado pela primeira vez por Rao em 1972 (CHEN *et al.*, 2006). No Brasil, o estudo pioneiro foi o de Lombardo (1985), o qual foi considerado como impulsionador desta linha de análise no país. A autora mostrou a ocorrência de ilha de calor na cidade de São Paulo, e identificou diferenças de até 10°C comparando áreas construídas e áreas com cobertura vegetal.

Albert *et al.* (2004) destacam que o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa para o monitoramento das mudanças no espaço urbano. Os autores falam também da gama de dados de média resolução da plataforma Landsat 5 (TM) os quais podem ser utilizados em ciências exatas e sociais para a quantificação da paisagem urbana. No entanto, Small (2002) alerta para a dificuldade de trabalhar com áreas urbanas utilizando imagens de média resolução espacial, isto se deve a heterogeneidade das superfícies urbanas (concreto, asfalto, árvores, telhas, metal, dentre outros). Para tanto, diversas técnicas e estudos foram desenvolvidos para melhorar a precisão na caracterização dos tipos de cobertura da terra no espaço urbano, como por exemplo classificação híbrida (ALBERT *et al.*, 2004), análise de pixel mistura (SMALL, 2002; MICHISHITA, 2012), redes neurais artificiais (KÍNOVÁ, 2015), e índices radiométricos para áreas construídas (ZHA, 2003; XU, 2007).

Ao considerar a resposta espectral de áreas urbanas no espectro emitido pode-se trabalhar com dados do infravermelho termal para determinar as variações das temperaturas

nessas áreas. Diversos trabalhos nesta abordagem podem ser citados como: Chen *et al.* (2006) realizaram uma análise da relação entre ilhas de calor urbanas e as mudanças no uso e cobertura do espaço urbano; Liu e Zhang (2011) analisaram ilhas de calor urbanas a partir de dados Landsat e Aster; Deng e Wu (2013) que analisaram os impactos das composições biofísicas urbanas em ilhas de calor urbanas utilizando dados da plataforma Landsat 7 (ETM+).

Trabalhos no Brasil também podem ser citados: Costa *et al.* (2010) utilizaram imagens do infravermelho termal para identificar ilhas de calor na área urbana da Ilha de Solteira – SP; Lima e Amorim (2011) utilizaram dados do infravermelho termal, NDVI e dados de campos para realizar uma análise da qualidade ambiental urbana em Nova Andradina – MS; Barros e Lombardo (2013) realizaram o zoneamento climático urbano de Recife a partir de dados da plataforma Landsat 5 (TM).

Quattrochi e Ridd (1994) ao analisar diferentes cidades com sistemas termais de alta resolução identificaram diferenças nas temperaturas nos variados usos do solo urbano. Os autores verificaram que as áreas comerciais apresentavam temperaturas mais altas, em seguida as áreas de serviços, transportes e indústria. As menores temperaturas foram encontradas na vegetação, água e terras agrícolas, já as áreas residenciais apresentaram temperaturas intermediárias.

Segundo Ortiz e Amorim (2011) a partir da elaboração de mapas de temperatura de superfície é possível verificar quais são os locais da cidade que merecem atenção por parte dos gestores públicos. É importante destacar que tanto os dados como *softwares* de processamento apresentaram grandes avanços nos últimos anos o que facilitou ainda mais a utilização do sensoriamento remoto em diversas áreas e diferentes análises.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para este estudo foi a cidade de Santa Maria localizada no município de mesmo nome no centro do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). O município, conforme dados do IBGE, é o quinto mais

populoso do Estado, sendo que a maioria da população reside em área urbana.

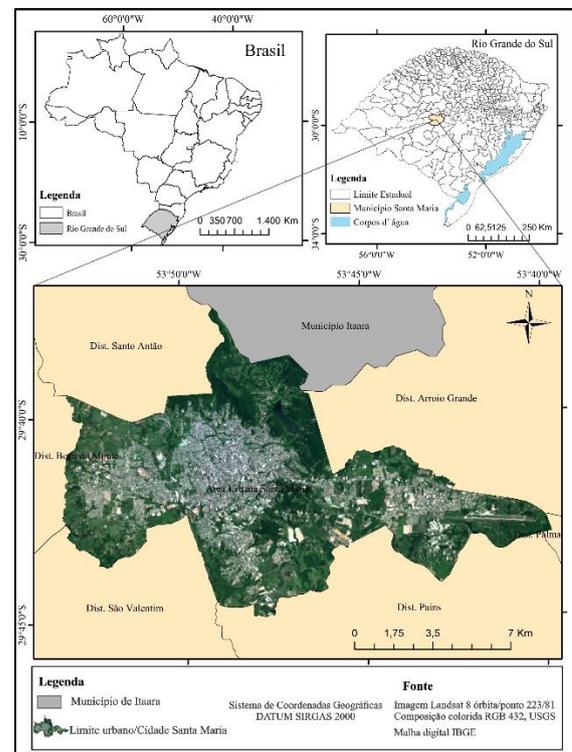


Fig. 1 - Localização Santa Maria - RS.

Geomorfologicamente o município no qual a cidade está inserida apresenta três unidades diferentes, a saber: 1ª Serra Geral situada ao norte abrangendo as maiores altitudes com uma topografia ondulada, resultante do vulcanismo fissural que ocorreu na Bacia do Paraná durante a Era Mesozoica; 2ª Rebordo do Planalto é a transição entre o Planalto e a Depressão Periférica, caracterizado por escarpas, vales e encostas íngremes, resultante da superposição dos sucessivos derrames de lava; 3ª Depressão Periférica, na qual a maior parte de Santa Maria se encontra, é caracterizada por colinas côncavas e convexas, as coxilhas, e as planícies aluviais constituídas por sedimentos recentes depositados pelos rios e arroios locais (IBGE, 1986; SARTORI, 2009).

Segundo a classificação climática de Köppen a cidade apresenta clima do tipo Cfa, o que significa ser um clima subtropical, caracterizando estações do ano bem definidas (KOTTEK *et al.*, 2006). A precipitação é significativa em todos os meses do ano e verões quentes. Segundo a classificação climática de Rossato (2011) para o estado do Rio Grande do

Sul, a cidade apresenta um clima do tipo Subtropical II caracterizado por ser mediamente úmido e com variação longitudinal das temperaturas médias. O volume médio de precipitação mensal gira em torno de 115 a 155 mm. A temperatura média anual é de 17-20°C. Segundo Sartori (2000), a cidade é uma das mais quentes do estado do Rio Grande do Sul devido ao efeito de continentalidade e baixa altitude onde está inserida.

De acordo com dados do IBGE (2010), a população do município de Santa Maria somava aproximadamente 217 mil habitantes em 1991 e em 2010, aproximadamente, 270 mil (Figura 2). A população urbana de Santa Maria apresentou um aumento de 26% de 1991 a 2010. Sendo que, em 1991, 2000 e 2010 a população urbana representava 90%, 94% e 95%, respectivamente, do total de habitantes do município.

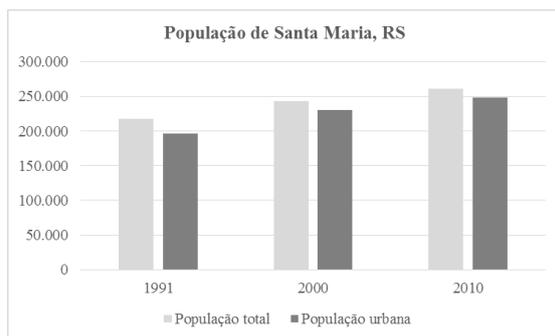


Fig. 2 - População de Santa Maria.

De acordo com a Agência de Desenvolvimento de Santa Maria, o fluxo monetário da cidade depende fundamentalmente do serviço público. A cidade destaca-se na região, no estado e no país como cidade portadora das seguintes funções em relação à prestação de serviços: comercial, educacional, médico hospitalar, rodoviário e militar (ADESM, 2017). A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e as Unidades Militares compõem os serviços públicos federais existentes na cidade. Além da UFSM, as instituições particulares de ensino também contribuem para a economia do município como um todo, além de movimentar um grande número de pessoas vindas de outras regiões do Estado.

Diante do exposto, cabe destacar que a escolha por esta área de estudo foi motivada devido a sua importância no sistema urbano do estado, suas características do sítio urbano, bem

como por ser considerada uma das cidades mais quentes do Estado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo correspondeu à aquisição dos materiais utilizados e desenvolvimento dos procedimentos metodológicos delineados em casa etapa da pesquisa.

3.1 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados meteorológicos registrados próximo ao horário da passagem do satélite Landsat e imagens de satélite dos sensores TM, OLI, e TIRS.

3.1.1 Dados orbitais

Os dados orbitais utilizados foram:

- Oito cenas do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat 5, com resolução espacial de 30 metros (bandas 2, 3, 4, 6 e 7), órbita ponto 223/81.
- Quatro cenas do Sensor OLI (*Operational Land Imager*) do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros (bandas 3, 4, 5, 7), órbita ponto 223/81.
- Quatro cenas do sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros (banda 10), órbita ponto 223/81.

As imagens foram selecionadas em datas que representassem as quatro estações do ano para um período de 1994 a 2014, conforme a disponibilidade de imagens sem nuvens. A análise temporal contou com 12 imagens adquiridas gratuitamente no portal earthexplorer da USGS (*United States Geological Survey*) (Tabela 1). As bandas referentes ao espectro refletido (verde, vermelho, infravermelho próximo e médio) foram adquiridas em reflectância de superfície. As bandas referentes ao espectro emitido (infravermelho termal) foram adquiridas em temperatura de brilho ou aparente. Cabe destacar que, as imagens do infravermelho termal foram disponibilizadas pela USGS reamostradas para uma resolução de 30 metros.

O processamento digital das imagens foi realizado nos softwares *Envi 5.3* e *QGIS 2.12*. Após todos os processamentos, as imagens

foram recortadas considerando o polígono no formato *shapefile* do limite da cidade de Santa Maria disponibilizado pelo IBGE.

Tabela CII 1 - Imagens de satélite.

Imagem	Data	Hora/UTC	Sensor
Verão	12/01/1994	12:52:30	TM
Verão	26/01/2005	13:17:20	TM
Verão	19/01/2014	13:32:13	OLI/TIRS
Outono	07/04/1996	12:39:53	TM
Outono	22/04/2007	13:25:49	TM
Outono	22/04/2013	13:32:51	OLI/TIRS
Inverno	29/08/1996	12:47:52	TM
Inverno	28/08/2007	13:24:18	TM
Inverno	28/08/2013	13:33:07	OLI/TIRS
Primavera	23/11/1998	13:10:06	TM
Primavera	26/11/2005	13:19:43	TM
Primavera	16/11/2013	13:32:45	OLI/TIRS

3.1.2 Dados meteorológicos

Para dar suporte à interpretação e análise das imagens de temperatura foram adquiridos dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e velocidade do vento) a partir do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que possui uma estação na Universidade Federal de Santa Maria.

Para os dados de precipitação foram considerados os registros de dados de 1, 10 e 30 dias antes de cada imagem. Já dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento foram considerados os horários próximos a passagem do satélite pela cidade. Todos os dados foram organizados em gráficos para melhor análise e compreensão (Figura 3).

3.2 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos seguiram sete processos que podem ser visualizados na Figura 4.

3.2.1 Cálculo dos índices radiométricos

Com o intuito de escolher a composição colorida que apresentasse melhor contraste entre os diferentes alvos na imagem foi realizada uma composição utilizada por França *et al.* (2012), a qual considerou a associação de índices radiométricos aos canais RGB. A seguir estão descritos os três índices utilizados.

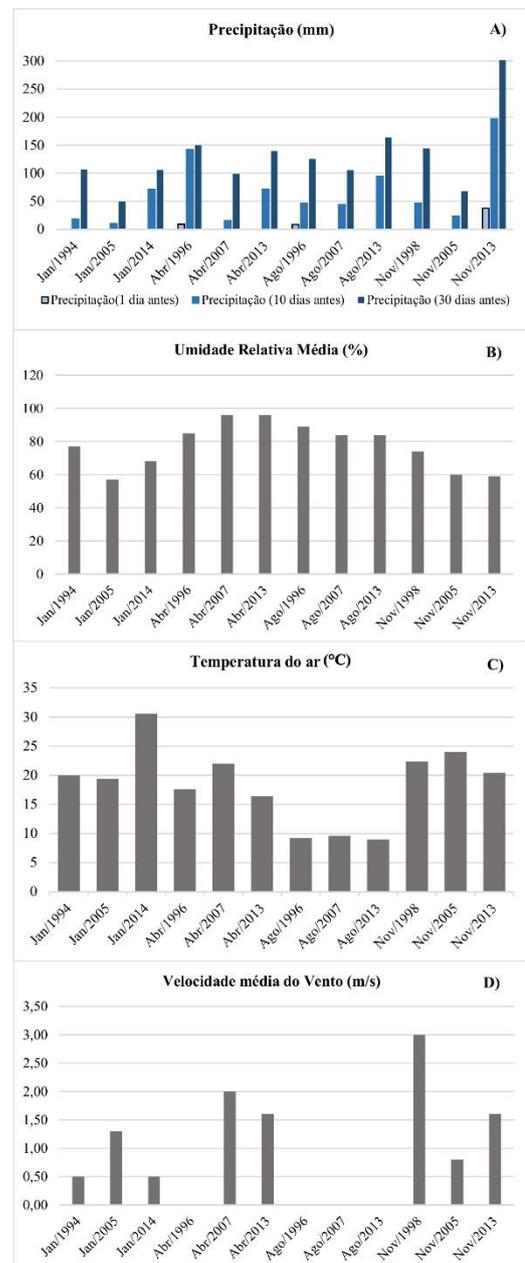


Fig. 3 - Dados meteorológicos A) precipitação; B) Umidade do ar; C) Temperatura do ar; D) Velocidade do vento.

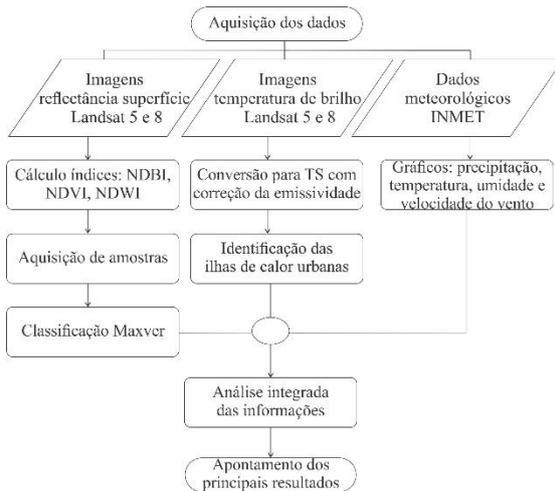


Fig. 4 - Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.

De acordo com França *et al.* (2012), a partir de índices radiométricos é possível identificar e realçar nas imagens determinados tipos de informações, como áreas edificadas, vegetação, corpos d' água, além de que a normalização pode contribuir para a redução de ruídos e efeitos de iluminação. Ao gerar cada índice, a imagem passa a apresentar novos valores, os quais estão no intervalo de -1 a +1. Nesse estudo foram calculados os índices radiométricos: para áreas construídas *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), Equação 1; para vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), Equação 2; e para água *Normalized Difference Water Index* (NDWI), Equação 3 utilizados por Zha (2003) e Xu (2007).

$$NDBI = \frac{\rho_{ivm} - \rho_{ivp}}{\rho_{ivm} + \rho_{ivp}} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (2)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{ivd} - \rho_{ivp}}{\rho_{ivd} + \rho_{ivp}} \quad (3)$$

onde, ρ_{ivm} = reflectância no infravermelho médio, ρ_{ivp} = reflectância no infravermelho próximo, ρ_{vm} = reflectância no vermelho, e ρ_{vd} = reflectância no verde.

Assim foi realizada a composição com os índices radiométricos descritos anteriormente.

Onde o NDBI, NDVI e NDWI foram associados aos canais RGB respectivamente.

3.2.2 Classificação supervisionada

A classificação de imagens correspondeu a determinação de diferentes coberturas da terra para área de estudo. Esta etapa serviu para verificar a expansão urbana de 1994 até 2014. A classificação foi realizada a partir do algoritmo *Máxima Verossimilhança* (*MaxVer*) com limiar de aceitação de 100%, sendo que este foi escolhido porque apresentou melhor desempenho neste trabalho. O classificador *MaxVer* considera a ponderação das distâncias entre as médias dos pixels das classes, sendo que assume que todas as bandas apresentam uma distribuição normal e calcula a probabilidade de um pixel pertencer a uma certa classe (RICHARDS, 1993; SCHOTT, 1997).

Assim, realizou-se uma análise visual nas imagens (composição colorida NDBI-R, NDVI-G, NDWI-B) para estabelecer as classes de cobertura presentes em cada uma. Com isto, foram estabelecidas cinco classes de cobertura: vegetação (áreas de cobertura vegetal mais densa); solo exposto (áreas sem cobertura vegetal); campo (áreas com gramíneas); água (reservatórios e açudes); e urbano (áreas construídas).

Após a definição das classes temáticas foram coletadas, em média, 20 amostras de treinamento para cada classe. Com a imagem já classificada realizou-se a edição matricial por meio de análise visual, a fim de corrigir áreas classificadas erroneamente pelo classificador.

Para analisar a exatidão das classificações foi utilizado o índice de concordância *Kappa*. O índice *Kappa* foi introduzido no sensoriamento remoto por Congalton, sendo que desde 1981 é amplamente utilizado por estudos da área (CONGALTON e GREEN, 2009). Para tanto, utilizou-se o índice *Kappa* para avaliar a concordância das amostras coletadas na fase de treinamento. As imagens disponíveis no *Google Earth* também serviram como apoio para verificar a concordância das classificações. Assim, considerou-se a os limiares de referência apresentados por Landis e Koch (1977), conforme a tabela 2.

Tabela CII 2 - Qualidade da classificação Índice Kappa.

Valor Kappa	Qualidade da classificação
< 0	Péssima
0 a 0,2	Ruim
0,2 a 0,4	Razoável
0,4 a 0,6	Boa
0,6 a 0,8	Muito Boa
0,8 a 1	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

3.2.3 Obtenção de temperatura de superfície

Para o cálculo da temperatura de superfície foram utilizadas as bandas 6 do Landsat 5 TM e 10 Landsat 8 TIRS. Normalmente, para se obter temperatura de superfície é necessário primeiramente converter os valores digitais das imagens para temperatura aparente ou de brilho e posteriormente realizar correções atmosféricas e da emissividade na imagem. Como já é possível obter as imagens de temperatura de brilho diretamente da USGS, a conversão não foi necessária.

Os procedimentos para cálculo de temperatura de superfície foram realizados no complemento *Land Surface Temperature* (LST) desenvolvido por Ndossi e Avdan (2016) disponível no *software QGIS*. Então, para a estimativa da temperatura de superfície considerou-se a correção apenas da emissividade, conforme a equação 4.

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{a}\right) * \ln \varepsilon} \quad (4)$$

T_b = temperatura de brilho ou aparente registrada pelo sensor em Kelvin;

λ = comprimento de onda médio do infravermelho termal;

$a = hc/K = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$, onde:

K = constante de Stefan-Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

h = constante de Planck ($6.28 \times 10^{-34} \text{ J/s}$)

c = velocidade da luz ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$\ln \varepsilon$ = logaritmo natural da emissividade da superfície.

A imagem de emissividade foi obtida a partir da metodologia desenvolvida por Van de Griend e Owe (1993), a qual relaciona a emissividade com o NDVI, conforme a tabela 3.

Tabela CII 3 - Imagem NDVI utilizada pelo algoritmo (LST).

NDVI	Emissividade
$\text{NDVI} < -0.185$	0.995
$-0.185 \leq \text{NDVI} < 0.157$	0.985
$0.157 \leq \text{NDVI} \leq 0.727$	$1.009 + 0.04 \times \ln(\text{NDVI})$
$\text{NDVI} > 0.727$	0.990

Fonte: adaptado Ndossi e Avdan (2016).

Conforme Valor e Caselles (1996) o erro cometido na estimativa da emissividade utilizando a equação apresentada na tabela 3 é inferior à 0,7 % para $0,157 < \text{NDVI} < 0,727$. Diversos trabalhos com a temática de recuperação da emissividade de superfície já foram realizados, como por exemplo, de Zhang *et al.* (2006) que recomendaram a utilização do NDVI para o cálculo de emissividade.

Como produto de saída foram obtidas as imagens de temperatura de superfície em graus celsius (°C). As imagens de temperatura °C foram submetidas a uma reclassificação na ferramenta “*Raster Color Slices*” do *Envi*, sendo estabelecidas 11 classes de temperatura com intervalo de 3°C.

3.2.4 Identificação de ilhas de calor urbanas

Para a identificação de ilhas de calor urbanas, primeiramente, verificou-se as estatísticas das imagens dentro do limite da cidade. Assim, anotou-se a temperatura média das imagens (Tabela 4). No segundo passo, aplicou-se a equação 5 em cada imagem com o auxílio da ferramenta *band math* do *Envi*.

$$\text{DifT} = B1 - T_{\text{med}} \quad (5)$$

Onde: DifT é a diferença entre a temperatura de cada pixel e a média de temperatura de toda área dentro do limite da cidade; B1 corresponde a imagem em temperatura de superfície; Tmed é o valor de temperatura média encontrado em cada imagem.

Para melhor visualização, todas as imagens foram submetidas a uma escala de cores divididas em 13 classes, as quais compreendem diferenças de temperatura desde -5°C negativos a mais de 6°C positivos em relação à média de temperatura da imagem.

Tabela CII 4 - Média de temperatura para cada imagem.

Imagem	Média ($^{\circ}\text{C}$)
12/01/1994	28,91
26/01/2005	29,34
19/01/2014	30,99
07/04/1996	20,70
22/04/2007	24,86
22/04/2013	22,47
29/08/1996	15,02
28/08/2007	16,37
28/08/2013	15,41
23/11/1998	30,24
26/11/2005	31,34
16/11/2013	26,45

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta etapa compreende a apresentação dos principais resultados alcançados com o desenvolvimento do presente trabalho. Para tanto, os resultados estão dispostos em três seções. Primeiramente, apresentam-se os resultados relacionados a expansão urbana da cidade para o período de análise. Posteriormente as análises das imagens de temperaturas de superfície de todas as imagens divididas por estação do ano. No terceiro momento, apresentam-se os produtos e análises relacionados a identificação de ilhas de calor urbanas na área de estudo.

4.1 Expansão urbana 1994 a 2014

A classificação supervisionada aplicada em cada imagem possibilitou verificar a expansão das áreas construídas na cidade de Santa Maria. Todas as imagens classificadas apresentaram um índice de desempenho *Kappa* muito bom, de acordo com a tabela de qualidade desenvolvida por Lands e Koch. Assim, constatou-se que, para o ano 1994, a classe urbano representou 2700

hectares. Sendo que, de 1994 a 2005 ocorreu um incremento de 800 hectares na cidade. No último ano da série estudada, a classe urbano somou aproximadamente 4600 hectares, ou seja, uma taxa de crescimento de 70% em relação a 1994 (Tabela 5).

Tabela CII 5 - Área e taxa de crescimento para a classe urbano 1994-2014.

Ano	Área ha	Incremento ha	Taxa de crescimento %
1994	2700,00	-	-
1996	2800,00	100,00	3,70
1998	3000,00	200,00	7,14
2005	3500,00	500,00	16,67
2007	3800,00	300,00	8,57
2013	4400,00	600,00	15,79
2014	4600,00	200,00	4,55
1994 a 2005		800,00	29,63
1994 a 2014		1900,00	70,37

A partir da análise das imagens classificadas, verificou-se que as áreas de maior expansão urbana compreendem as regiões oeste, centro, e leste da cidade. A figura 5 representa as áreas da classe urbano para os anos de 1994, 2005 e 2014, sendo possível identificar as áreas de expansão. Assim, pode-se dizer que a cidade exibiu uma expansão urbana na direção leste-oeste, um dos motivos é a existência de barreiras físicas do rebordo do Planalto e os morros de sudeste.

A região oeste, é caracterizada por bairros de periferia, sendo que nela existem dois conjuntos habitacionais que contribuíram para a expansão da região. Já na região leste, por estar inserida a Universidade Federal de Santa Maria, apresenta um crescimento cada vez mais evidente, já que muitas vezes os estudantes e funcionários da instituição optam por residir em suas proximidades. Assim, o investimento em novos empreendimentos imobiliários contribui para a expansão urbana da região.

O processo de classificação também permitiu a compreensão da distribuição das temperaturas de superfície na cidade. A partir do conhecimento da distribuição dos diferentes tipos de cobertura presentes na cidade foi possível constatar quais áreas que predominavam as temperaturas mais brandas e

as mais elevadas. Na maioria das imagens constatou-se que a classe urbano apresentou temperaturas superiores que as demais classes.

No entanto, nas áreas com predomínio de solo exposto também ocorreram temperaturas altas. Em contrapartida, constatou-se que nas áreas com vegetação as temperaturas permaneceram mais amenas (Tabela 6).

A menor temperatura em áreas com vegetação também foi encontrada por Kumar e Shekhar (2015) a partir da correlação entre a temperatura de superfície terrestre e índices de vegetação e área construída. Ainda, Alves *et al.* (2012) constataram que áreas mais arborizadas apresentaram temperaturas menores que as áreas menos arborizadas na cidade. Assim, confirma-se a contribuição que a implantação de áreas com cobertura vegetal proporcionaria às áreas mais quentes da cidade.

Tabela CII 6 - Temperatura média para as classes de cobertura.

Imagem	Urbano	Veg.	Campo	Solo	Água
Jan/94	31,89	25,86	27,92	29,83	26,04
Jan/05	31,99	23,65	27,76	31,15	25,45
Jan/14	34,01	27,80	29,58	31,13	27,97
Abr/96	22,30	18,87	20,46	21,82	21,16
Abr/07	26,86	22,83	24,07	26,48	24,83
Abr/13	22,63	19,24	21,59	22,99	20,32
Ago/96	14,95	12,21	14,66	15,78	14,18
Ago/07	16,47	12,72	15,40	17,09	14,04
Ago/13	14,96	12,46	14,65	15,45	12,13
Nov/98	33,14	26,31	29,49	32,94	25,44
Nov/05	33,47	26,38	30,11	33,53	26,47
Nov/13	29,60	22,31	25,36	26,48	21,66

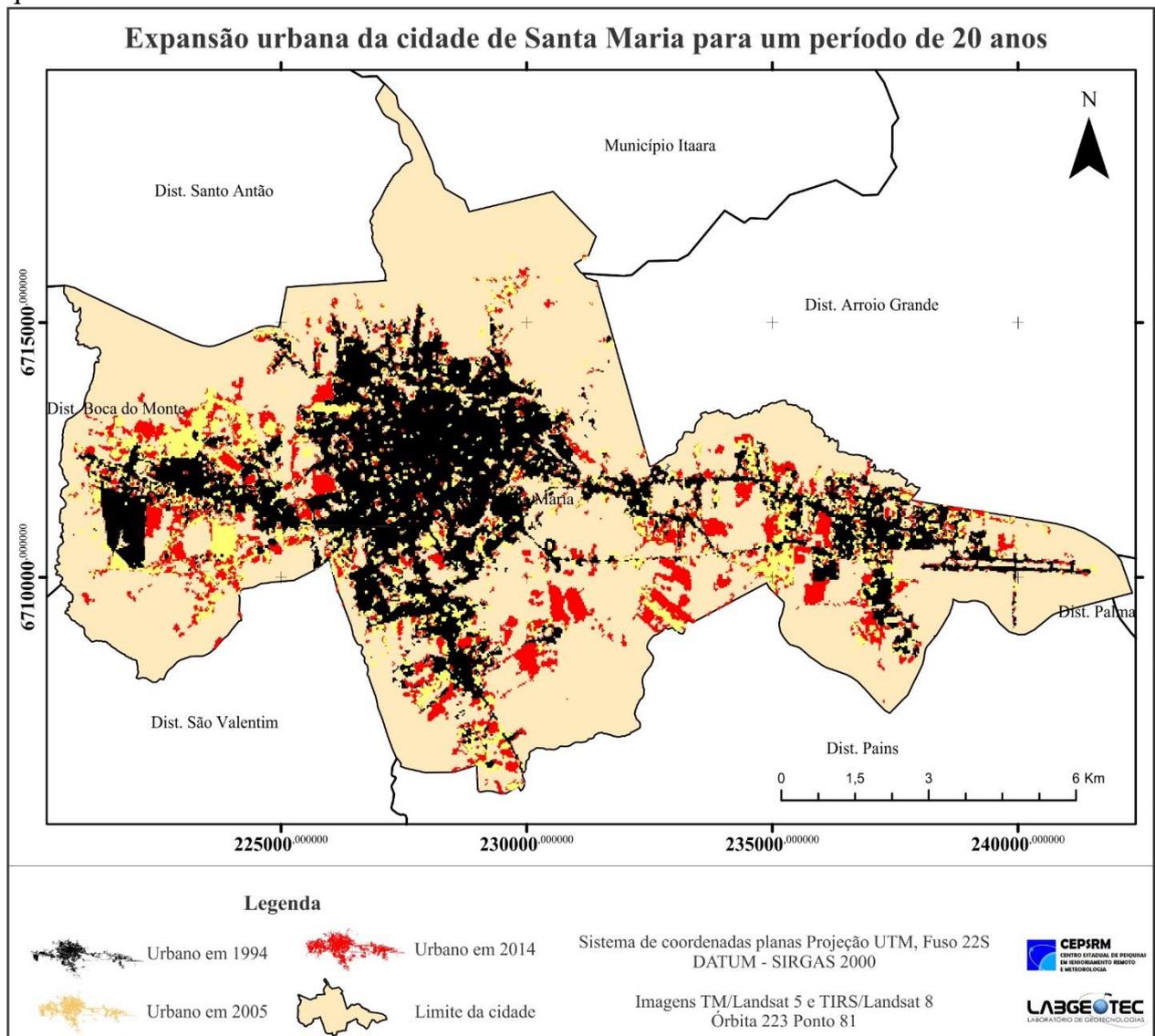


Fig. 5 - Expansão urbana da área de estudo.

4.2 Temperatura de superfície - Verão

O processamento das imagens da banda do infravermelho termal, banda 6 Landsat5 e banda 10 Landsat 8, possibilitou a caracterização da distribuição da temperatura de superfície na área de estudo para as quatro estações do ano. Neste sentido, imagens dos meses de janeiro, abril, agosto e novembro representam as estações verão, outono, inverno e primavera respectivamente. Os meses citados foram escolhidos devido a disponibilidade de imagens sem interferências de nuvens ou ruídos.

Para as imagens de janeiro observou-se temperaturas elevadas variando no intervalo de 23°C a mais de 38°C (Figura 6). Na imagem de 1994 constatou-se o predomínio de basicamente quatro classes de temperatura (23 a 26°C, 26 a 29°C, 29 a 32°C e 32 a 35°C), sendo que apenas 2% da área total da cidade verificou-se temperaturas de 35 a 38°C.

Na imagem de 2005 verificou-se o predomínio das mesmas classes de temperatura da imagem de 1994. No entanto, algumas áreas apresentaram-se com temperaturas mais amenas entre 20 e 23°C, representando 5% da área total da cidade. Em contrapartida, na classe de 35 a 38°C observou-se um aumento de 1% da área em relação a 1994. Ao analisar as imagens verificou-se que as temperaturas mais elevadas também ocorreram em regiões com cobertura de campo e solo exposto. Este fato pode ter ocorrido devido ao baixo volume de precipitação registrado 30 dias antes da imagem, segundo dados do INMET, sendo este mês caracterizado por baixo índice pluviométrico.

Ao analisar a imagem de 2014 constatou-se um aumento nas temperaturas em relação aos anos anteriores. Sendo que, ocorreu o predomínio de temperaturas de 26°C a mais que 38°C. A classe de 35°C a 38°C representou 10% da área total da cidade. Nesta imagem, também ocorreram temperaturas superiores a 38°C, o que não constatou-se nas imagens de 1994 e 2005.

Ao comparar as três imagens observou-se um aumento gradativo das temperaturas. Em janeiro de 1994, 44% da cidade apresentou temperaturas entre 26°C a 29°C. Já para os anos de 2005 e 2013 as temperaturas entre 29°C a 32°C ocorreram em 34% e 40% da área da cidade respectivamente. A justificativa para este fato

pode ter sido o aumento das áreas construídas na cidade, como verificado na seção anterior.

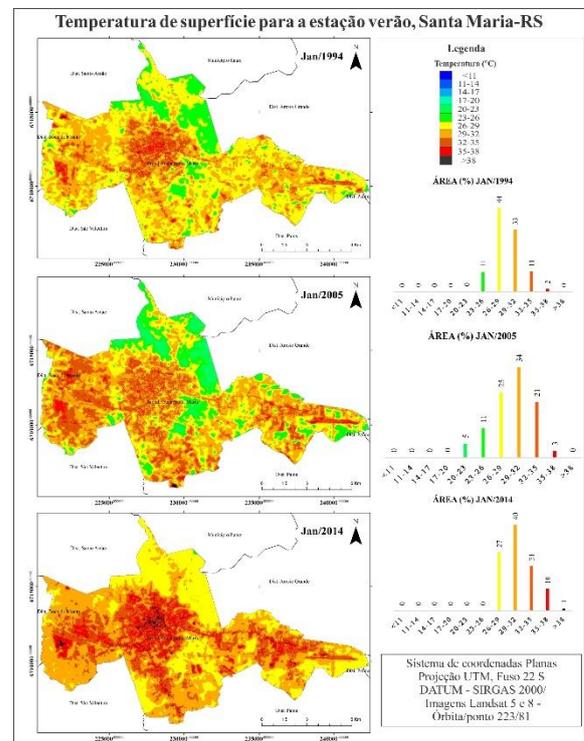


Fig. 6 - Imagens de temperatura de superfície para as imagens de janeiro de 1994, 2005 e 2014.

4.3 Temperatura de superfície – Outono

Nas imagens do mês de abril para os anos de 1996, 2007 e 2013 predominaram temperaturas mais amenas. Os valores de temperatura variaram de 14°C a 32°C (Figura 7). Para o ano de 1996 as classes representativas da estação somaram 90% da área total com temperaturas entre 17°C e 23°C. Sendo que, 7% da área da cidade exibiu valores entre 23°C a 26°C.

Para a imagem de 2007 as temperaturas de 20°C a 29°C representaram 98% da área total, sendo que, no restante da área ocorreram temperaturas mais elevadas de 29°C a 32°C. Na imagem de 2007, é visível o aumento das temperaturas, pois as cores não apresentaram-se de forma homogênea como nas demais imagens. Para a data da imagem também foram registradas maiores temperaturas do ar, com máxima de 35°C, como foi exposto na Figura 3-C. A precipitação também foi mais baixa 30 dias antes da imagem em relação as outras imagens da estação (Figura 3-A).

Na imagem de 2013 ocorreu o predomínio de temperaturas de 17°C a 29°C.

Diferente de 2007 anterior, as temperaturas de 20°C a 26°C somaram 68% da área total da cidade. Observou-se um aumento das temperaturas em relação ao ano de 1994, no entanto, comparando a 2007 as temperaturas foram menores.

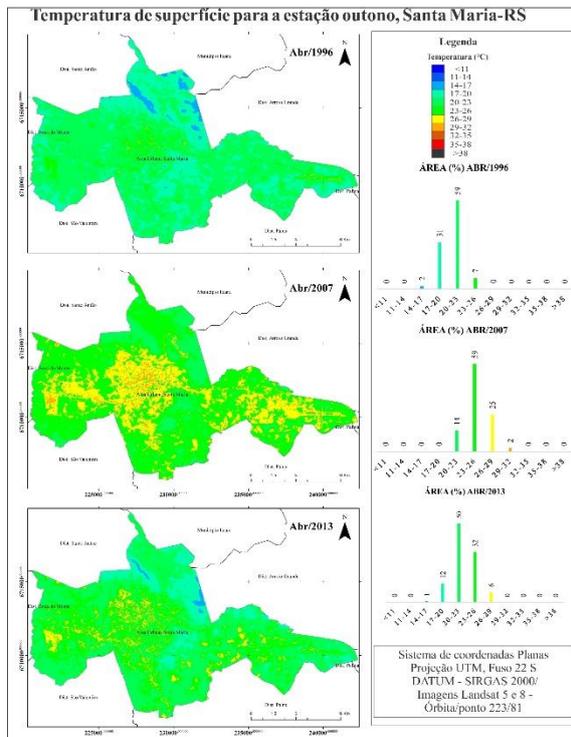


Fig. 7 - Imagens de temperatura de superfície para as imagens de abril de 1996, 2007 e 2013.

4.4 Temperatura de superfície - Inverno

A estação do inverno caracterizou-se com as menores temperaturas, sendo que observaram-se valores inferiores a 11°C e com máxima de 23°C (Figura 8).

Para a imagem de 1996 a classe de 14°C a 17°C ocorreu em 69% da área total da cidade. Já, as temperaturas de 17°C a 20°C foram registradas em 10% da área, em localizações dentro do ambiente construído.

Na imagem de 2007 verificou-se que a classe de 14°C a 17°C passou a representar uma menor área, 44%. Em contrapartida, as temperaturas entre 17°C a 20°C, que em 1996 representavam 10% da área, para 2007 foram verificadas em 40% da área da cidade. Para este ano, 3% da área da cidade (áreas construídas) apresentou temperaturas entre 20°C a 23°C.

Na imagem de 2013 verificou-se novamente o predomínio das classes de 14°C a 17°C e 17 a 20°C, com cada uma representando

58% e 21% da área da cidade, respectivamente. Comparando as três imagens constatou-se que as temperaturas entre 17°C a 20°C apresentaram um aumento em relação ao ano de 1996. E as áreas com temperaturas de 11°C a 14°C diminuíram no decorrer da série estudada.

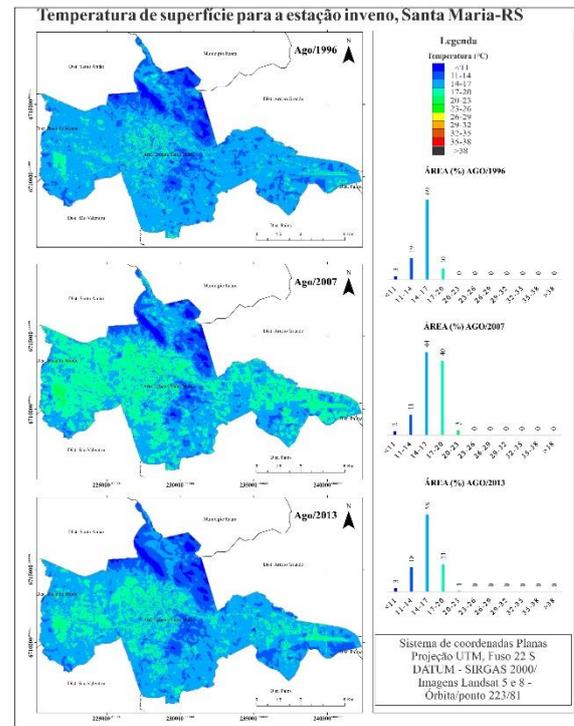


Fig. 8 - Imagens de temperatura superfície para agosto de 1996, 2007 e 2013.

4.5 Temperatura de superfície - Primavera

Assim como no verão, as imagens da primavera também apresentaram-se com temperaturas mais elevadas. Os valores mínimos registrados foram de 17°C e a máxima foi superior a 38°C (Figura 9). Para a imagem de 1998 as temperaturas de 26°C a 35°C representaram 89% da área da cidade. Sendo que, as temperaturas mais elevadas, 35°C a 38°C, ocorreram em áreas construídas representando 5% do total.

A imagem de 2005 apresentou os valores mais elevados de temperatura de todas as imagens analisadas. Desta forma, as temperaturas de 35°C a 38°C que foram registradas em apenas 5% da área em 1998, em 2005 passou a 14%. As temperaturas superiores a 38°C somaram 4% da área da cidade. Vale destacar, que as temperaturas mais elevadas foram todas registradas em áreas com predomínio de construções. O baixo volume de precipitação (aproximadamente 50 mm)

registrado 30 dias antes da imagem, assim como baixa umidade relativa do ar e velocidade do vento de aproximadamente 1 m/s registrados na estação do INMET podem ter contribuído para o aumento da temperatura de superfície em novembro/2005. Sendo que, 2005 foi considerado um ano de estiagem no Estado do Rio Grande do Sul.

Na imagem de novembro/2013, em 46% da área da cidade identificou-se temperaturas de 20°C a 26°C, caracterizando um aumento de áreas com temperaturas mais amenas em relação as imagens de 1998 e 2005. A diminuição das temperaturas pode ter ocorrido porque 30 dias antes da imagem foram registrados valores elevados de chuva, chegando a 300 mm. No entanto, cabe destacar que mesmo assim, as áreas urbanizadas exibiram os valores mais elevados de temperaturas.

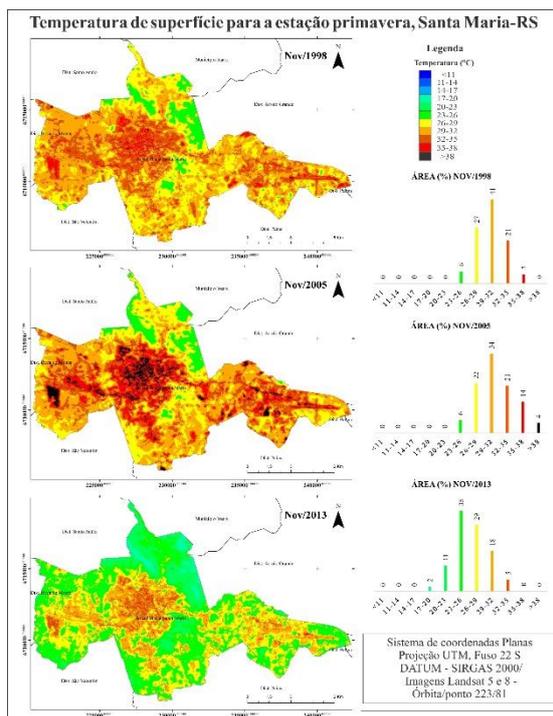


Fig. 9 - Imagens de temperatura de superfície para novembro de 1998, 2005 e 2013.

4.6 Ilhas de calor urbanas

Ao analisar as imagens anteriormente apresentadas identificou-se um aumento das temperaturas de superfície para as todas as estações do ano. Na estação do verão, verificou-se um incremento para temperaturas de 35°C a 38°C, sendo que em 1994 esta classe somava apenas 2% da área total da cidade e passou a

assumir um total de 10% em 2014. No o outono, o aumento foi verificado para temperaturas de 23°C a 26°C. Em abril/1996 a referida classe representou 7% da área, para os anos de 2007 e 2013 foi superior a 30 % da área da cidade. No inverno, as temperaturas de 17°C a 20°C apresentaram um aumento, de 10 % em 1996 para 40% em 2007. Já para o ano de 2013, a referida classe apresentou um aumento para 21% em relação a 1996. Em relação a estação da primavera, constatou-se que o aumento das temperaturas ocorreu somente da imagem de 1998 para a de 2005, pois a de 2013 apresentou temperaturas mais amenas.

Neste trabalho verificou-se que dois fatores justificaram as situações citadas no parágrafo anterior. A primeira é a questão do aumento das áreas construídas na cidade, como foi possível constatar a partir das classificações das imagens. Diversos trabalhos científicos concluem que em áreas que predominam materiais de construção como, concreto, asfalto, telhados de diversos materiais tendem a apresentar temperaturas superiores do que áreas com predomínio de cobertura natural. Assim, com o aumento das áreas construídas, consequentemente, as imagens de temperatura de superfície mostraram um aumento das áreas com temperaturas mais elevadas ao longo da série estudada. O segundo fator é a condição meteorológica da área de estudo, como por exemplo, a distribuição das chuvas em alguns dias antes das imagens. Um exemplo é a imagem de novembro de 2013, a estação meteorológica do INMET registou valores elevados de precipitação trinta dias antes da passagem do satélite, o que contribuiu para que as temperaturas se apresentassem mais amenas.

A partir das imagens do infravermelho termal foi possível realizar uma caracterização da distribuição das temperaturas na cidade de Santa Maria. Assim, duas questões puderam ser expostas. A primeira, diz respeito caracterização de cada estação do ano quanto as temperaturas de superfície na cidade. A segunda deixa claro que a partir das imagens foi possível identificar um aumento de áreas com temperaturas mais elevadas ao longo da série estudada, e assim, reafirmar que a ampliação de áreas urbanizadas contribui para a ocorrência de temperaturas elevadas.

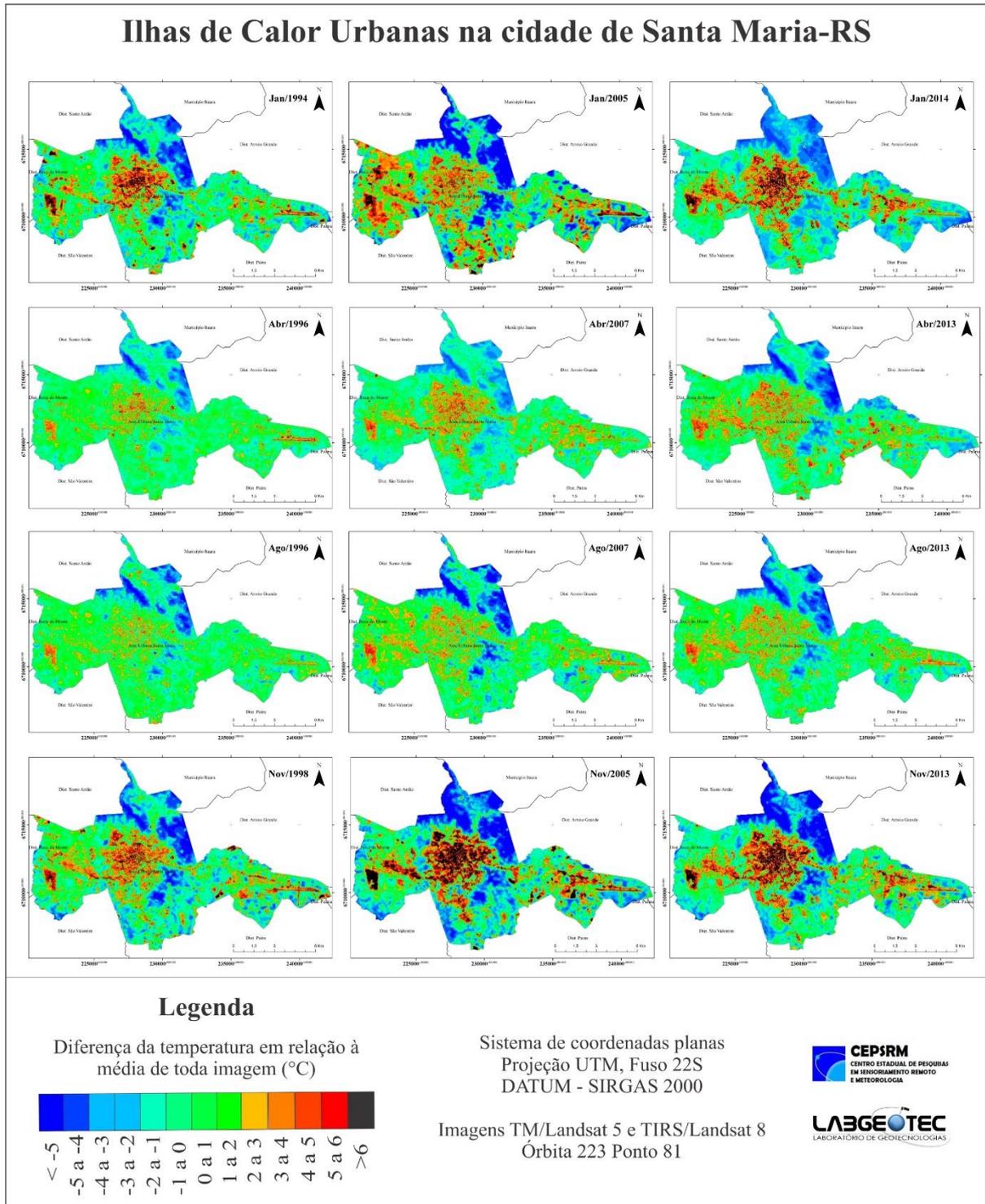


Fig. 10 - Representação das ilhas de calor urbanas para as quatro estações do ano.

Além das questões citadas, uma outra informação importante foi extraída das análises das imagens, a identificação de áreas com temperaturas mais elevadas – ilhas de calor urbanas. Como foi exposto na seção anterior, cada estação do ano apresentou uma distribuição distinta dos valores de temperatura, o que não deixou tão claro quais as áreas que realmente apresentaram-se mais quentes em

relação ao ambiente circunvizinho. Desta forma, optou-se por submeter cada imagem a um simples processo, subtrair cada imagem do seu valor médio de temperatura. Assim, foi possível verificar quais as áreas que apresentaram-se com valores de temperatura superiores a sua média e ao mesmo tempo padronizar as imagens para as quatro estações do ano a partir do fatiamento.

Neste sentido, a partir da metodologia citada foi possível identificar a distribuição das ilhas de calor urbanas (Figura 10). Assim, verificou-se que as diferenças de temperatura em relação à média de cada imagem variaram de -5°C negativos a valores superiores a 6°C positivos. Cabe destacar, que as diferenças negativas ocorreram em áreas com predomínio de cobertura vegetal. Já as diferenças positivas identificaram áreas com construções ou solo exposto.

Neste trabalho, as diferenças positivas superiores a 3°C foram denominadas de ilhas de calor urbanas para a cidade de Santa Maria. Conforme pode ser constatado na figura 10, foi possível identificar as áreas que mais ocorrem ilhas de calor, sendo algumas áreas nas regiões leste, centro e oeste da cidade. Com uma breve análise visual das imagens de ilhas de calor urbanas foi possível constatar que nas estações

de primavera e verão o fenômeno é mais proeminente, registrando diferenças de temperaturas superiores a 6°C . Sendo que, nas regiões mais centrais ocorreu a concentração de temperaturas mais elevadas. Já para as estações de outono e inverno, mesmo que as ilhas de calor tenham se apresentado bem definidas, verificou-se que nestas áreas as diferenças de temperatura foram menores em relação à média do que nas outras estações.

A partir do fatiamento das imagens em classes de diferenças de temperaturas também foi possível extrair informações a respeito da soma das áreas de cada classe. O que permitiu verificar que as áreas com temperaturas superiores a 3°C de diferença em relação à média apresentaram uma tendência de aumento ao longo da série estudada. Este fato ocorreu para todas as estações do ano (Figura 11).

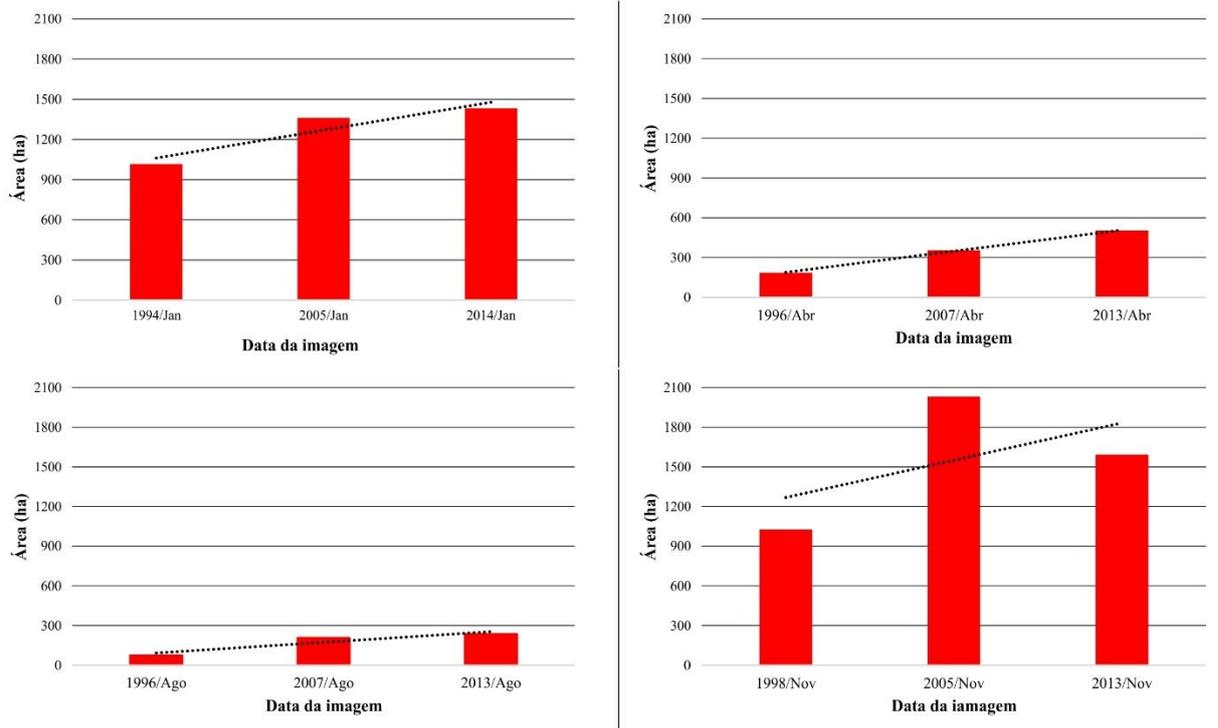


Fig. 11 - Área que as ilhas de calor urbanas representaram na série temporal de imagens estudadas.

Nas imagens do verão, as ilhas de calor que em 1994 ocupavam uma área de aproximadamente 900 hectares, em 2014 passaram para quase 1400 hectares. Nas imagens do outono aproximadamente 185 hectares apresentavam temperaturas com diferenças superiores a 3°C , para abril de 2013 subiu para

350 hectares. Para o inverno, mesmo apresentando menor ocorrência de ilhas de calor, estas de 76 hectares em 1996 passaram a ocupar 230 hectares em 2013. Assim como no verão, nas imagens da primavera o aumento das áreas com ilhas de calor urbanas foi bem representativo, passou de 900 hectares em 1998 para a 1500 em 2013.

Como em diversos trabalhos, neste também verificou-se que as áreas com cobertura vegetal tendem a apresentar temperaturas mais amenas. Conforme Gartland (2010), a presença de vegetação pode reduzir as ilhas de calor de duas formas. A primeira diz respeito as sombras produzidas pelas árvores para as pessoas, pavimentos e edifícios o que mantém as superfícies mais frescas. A segunda fala que, no processo de evapotranspiração, as plantas utilizam a energia solar para evaporar água, assim esta energia não seria utilizada para aquecer a cidade.

Ao substituir as superfícies naturais, como vegetação, por materiais urbanos os quais são impermeáveis e não evaporativos, ocorre um escoamento acelerado das águas das chuvas, sendo que parte é coletada pelos sistemas urbanos de saneamento, ocasionando a diminuição de água disponível e o tempo de evaporação. Desta forma, nas áreas urbanas, toda a radiação líquida à superfície é convertida em fluxo de calor sensível e assim ocorre um aumento de temperatura. Já as áreas com vegetação, as temperaturas tendem ser menores devido ao efeito de sombreamento das superfícies e os altos níveis de calor latente devido a maior disponibilidade de água disponível para a evaporação e evapotranspiração (OKE, 1982).

Conforme Christen e Vogt (2004), as áreas urbanas por apresentarem materiais, como asfalto, concreto e telhados, apresentam baixo albedo. Assim, geralmente as áreas urbanizadas refletem menos e absorvem mais radiação solar o que ocasiona um aumento na temperatura de superfície. Sendo que, as áreas urbanizadas são mais eficientes em armazenar energia solar, podendo absorver e armazenar duas vezes mais calor do que as áreas rurais.

Pode-se dizer que os resultados obtidos com o presente trabalho estão de acordo com estudos como Streutker (2003), Weng *et al.* (2003), Kumar e Shekhar (2015) os quais mostram que a ilha de calor urbana é consequência do processo de urbanização. Sendo destacado o papel da vegetação como importante aliado para a amenização das temperaturas na cidade.

5. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas nesta pesquisa foi possível estabelecer algumas conclusões acerca das temperaturas de superfície para todo o perímetro urbano de Santa Maria. Com a avaliação temporal das informações foi possível assinalar o aumento de temperatura para o período estudado. O que contribuiu para este fato pode ter sido o incremento das áreas construídas na cidade, sendo que as temperaturas em áreas com cobertura construída apresentaram-se mais elevadas. Em contrapartida, as áreas com cobertura vegetal apresentam temperaturas mais brandas.

A partir da análise espacial da temperatura de superfície foi possível identificar áreas que apresentaram temperaturas mais elevadas para toda série estudada, configurando ilhas de calor urbanas. Destacam-se, as regiões: oeste (proximidades dos bairros Tancredo Neves e Juscelino Kubistchek), região central (bairro Centro), e região leste (aeroporto localizado no bairro Camobi). Pode-se dizer que o fenômeno de ilhas de calor urbanas ocorreu para todas as estações da série estudada. No entanto nos meses de novembro e janeiro, a intensidade das ilhas de calor foi maior, registrando temperaturas com 6°C superiores à média.

Todas as constatações verificadas com o desenvolvimento do presente trabalho permitem afirmar o quanto é importante o estudo da distribuição da temperatura na cidade, pois a partir disto foi possível identificar áreas com temperatura mais elevadas, bem como o possível aumento destas áreas com o passar dos anos. Sabe-se que as condições térmicas do ambiente influenciam muito no cotidiano das pessoas, seja em questões de saúde, seja para a realização das mais variadas atividades. Assim, questões relacionadas ao conforto térmico das cidades também devem ser levadas em consideração nos planos diretores das cidades, já que a urbanização é cada vez mais crescente.

Desta forma, pode-se dizer que os resultados obtidos demonstraram a eficiência do sensoriamento remoto como aliado na análise e identificação de ilhas de calor urbanas, pois mesmo com a utilização de imagens de

média resolução espacial, foi possível apontar as regiões que necessitam mais atenção dos gestores públicos. Como explanado anteriormente, as áreas vegetadas apresentaram as temperaturas mais brandas. Desta forma, uma alternativa para o melhor conforto térmico em áreas residenciais seria a implantação de espaços com cobertura vegetal. Então, um plano de paisagismo ajudaria a minimizar os efeitos das altas temperaturas nas regiões mais quentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE SANTA MARIA. (ADESM). **Aspectos gerais de Santa Maria**. Disponível em: <<http://santamariaemdados.com.br/1-aspectos-gerais/>> Acesso: 18 janeiro 2017.
- ALBERT, M. WEEKS, R. COE, S. Urban land-cover change analysis in Central Puget Sound. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, v. 70, n. 9, p. 1043-1052, 2004.
- ALVES, D. B. FIGUEIRÓ, A. S. Vegetação urbana e variabilidade do campo térmico em áreas selecionadas da cidade de Santa Maria (RS). **Revista GEONORTE**, Edição especial, v. 2, n.4, p.1111-1125, 2012.
- BARROS, H. R. de; LOMBARDO, M. A. Zoneamento climático e urbano da cidade do Recife: uma contribuição ao planejamento urbano. **GEOUSP**, São Paulo, n. 33, p. 187 – 197, 2013.
- CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P. X.; YIN, Z.Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing Environment**, v.104, p. 133-146, 2006.
- CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a Central European city. **International Journal of Climatology**, Chichester, v.24, p.1.395-1.421, 2004.
- CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data**. Principles and practices. 2 ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 210 p.
- COSTA, D. F. da.; SILVA, H. R.; PERES, L. de F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira – SP através da utilização de geotecnologias. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.30, n.5, p. 974-985, 2010.
- DENG, C.; WU, C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: a spectral unmixing and thermal mixing approach. **Remote Sensing Environment**, v.131, p. 262-274, 2013.
- FRANÇA, A. F. de; TAVARES JUNIOR, A. R; MOREIRA FILHO, J.C.C. Índices, NDVI, NDWI, NDBI como ferramentas ao mapeamento temático do entorno da lagoa olho D'Água, em Jabotão dos Gauraraoes-PE. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2012. **Anais**. p.001-009, 2012.
- GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 148p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm> Acesso: 20 janeiro 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso: 01 janeiro 2017.

- KÍNOVÁ, A.; DOBROVOLNY, P. A neural nets urban land cover classification: a case study of Brno (Czechia). **AUC Geographica**, v.50, n.2, p. 153-163, 2015.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259 – 263, 2006.
- KUMAR, D.; SHEKHAR, S. Statistical analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship through thermal remote sensing. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.121, p. 39-44, 2015.
- LANDIS, J.; KOCH, G. G. The measurements of agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 3, p. 159 – 179, 1977.
- LIMA, V.; AMORIM, M. C. C. T. A utilização de informações de temperatura da superfície, do NDVI e de temperatura do ar na análise de qualidade ambiental urbana. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais**. p. 128-135, 2011.
- LIU, L.; ZHANG, Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. **Remote Sensing**, v.3, p. 1535-1552, 2011.
- LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.
- MICHISHITA, R.; JIANG, Z.; XU, BING. Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p.3-18, 2012.
- NDOSSI, M. I.; AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.
- NUCCI, J. C. Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília. 2ª ed. Curitiba: O Autor, 2008.
- OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environments**, v. 7, n. 8, 769-779, 1973.
- OKE, T.R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v.108, p.1-4, 1982.
- ORTIZ, G. F.; AMORIM, M.C.C.T. Temperatura da superfície da cidade de Cândido Mota-SP a partir da imagem de satélite Landsat 7. **Revista Geográfica da América Central**, v.1, p. 1-16, 2011.
- QUATTROCHI, D. A.; RIDD, M. K. Measurement and analysis of thermal energy from discrete urban surfaces using remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 10, p. 1991-2022, 1994.
- RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2ed. New York: Springer-Verlag, 1993.340p.
- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidades, tendências e tipologia**. 2011. 253f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- SARTORI, M. G. B. **Clima e Percepção**. 2000. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paul, São Paulo, 2000.
- SARTORI, P. L. P. Geologia e Geomorfologia de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**. Santa Maria, n. 38, p.19-43, jan./jun. 2009.
- SCHOTT, J. R. **Remote Sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University, 1997.394p.
- SILVA, E. N.; RIBEIRO, H.; SANTANA, P. Clima e Saúde em Contextos Urbanos: Uma Revisão da Literatura. **Biblio 3W**, Barcelona, v. 19, n.1092 p.1-27. 2014.

- SMALL, C. Multitemporal analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n.3, p. 427-442, 2002.
- STREUTKER, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v.85, p.282 – 289, 2003.
- VALOR, E.; CASELES, V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South Americas áreas. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 167 – 184, 1996.
- VAN de GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119 – 1131, 1993.
- WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.89, p.467-483, 2003.
- XU, H. Extraction of urban built-up Land features from Landsat imagery a thematic-oriented index combination technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 73, n. 12, p. 1381- 1391, 2007.
- ZHA, Y. J. GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**. v. 24, n.3, p.583-594, 2003.
- ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C + + program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1796 – 1805, 2006.

CAPÍTULO III. ANÁLISE DAS VARIAÇÕES SAZONAIS DA TEMPERATURA NA ÁREA URBANA E ENTORNO RURAL DE SANTA MARIA – RS, BRASIL, A PARTIR DE PONTOS FIXOS DE COLETA DE DADOS E IMAGENS ORBITAIS

ANÁLISE DAS VARIAÇÕES SAZONAIS DA TEMPERATURA NA ÁREA URBANA E ENTORNO RURAL DE SANTA MARIA – RS, BRASIL, A PARTIR DE PONTOS FIXOS DE COLETA DE DADOS E IMAGENS ORBITAIS

ANALYSIS OF SEASONAL TEMPERATURE VARIATIONS IN THE URBAN AND SURROUNDING RURAL AREAS OF SANTA MARIA – RS, BRAZIL, FROM FIXED POINTS OF ORBITAL DATA AND IMAGES COLLECTION

Patricia Michele Pereira TRINDADE¹; Dejanira Luderitz SALDANHA¹; Waterloo PEREIRA FILHO²

¹Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – CEPSRM – UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), Brasil.

E-mails: patriciatrindade.sr@gmail.com,dejanira.saldanha@ufrgs.br

²Pós-Graduação em Geografia – CCNE – UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria (RS), Brasil. E-mail: waterloopf@gmail.com

Introdução

Área de Estudo

Materiais e Métodos

Implantação de pontos fixos para coleta de dados

Processamento das imagens orbitais

Resultados e Discussões

Aferição dos abrigos

Temperatura do ar (março/2017 a março/2018)

Temperatura do ar por estação do ano

Outono

Inverno

Primavera

Verão

Temperatura do ar por período do dia

Temperatura de superfície (imagens termais)

Conclusões

Agradecimentos

Referências

RESUMO - O objetivo deste estudo foi verificar as diferenças térmicas entre o espaço urbano e o entorno rural de Santa Maria – RS no período de março/2017 a março/2018 a partir de pontos fixos de coletas de dados e imagens orbitais. A primeira etapa da pesquisa consistiu na distribuição de 10 *data loggers* em área urbana e rural, registrando a temperatura do ar (Tar) para o período supracitado. A segunda etapa correspondeu à aquisição da temperatura de superfície (TS) a partir imagens termais Landsat 8, compreendendo as quatro estações do ano. O resultado indicou que as áreas urbanas apresentaram Tar superior ao rural principalmente na primavera e verão. O ponto T6, área centro-comercial, apresentou maior aquecimento que os demais durante a noite e madrugada e no ponto T3, maior altitude e densa arborização, verificou-se as menores temperaturas. Os valores de TS também foram superiores em área urbana, no entanto, no meio rural também verificou-se TS elevada em áreas de solo exposto. De modo geral, TS foi superior à Tar, com maior diferença nos pontos urbanos. Destaca-se que a pesquisa possibilitou a análise da variação da temperatura na área de estudo a partir da integração de dados de campo e de sensoriamento remoto.

Palavras-chave: Imagens termais, Ilha de calor urbana, Correção de imagens, Experimento de campo.

ABSTRACT – The objective of this study was the assessment of thermal differences between urban space and the surrounding rural area of Santa Maria – RS, Brazil, between the period of March/2017

and March/2018 from fixed points of orbital data and images collection. The first stage of the research consisted in the distribution of 10 data loggers in urban and rural areas, registering the air temperature (AT) for the aforementioned period. The second stage corresponded to the acquisition of surface temperature (ST) from Landsat 8 thermal images, comprising the four seasons of the years. The results indicated that the urban areas presented AT superior to the rural area, especially during spring and summer. The T6 point, a commercial center area, presented higher temperatures than the other areas during the night and before dawn, and in the T3 point, an area with higher altitude and dense forestation, the lowest temperatures were verified. The ST values were also superior in the urban area; however, in the rural environment, high ST was also verified in areas of exposed soil. In general, ST was superior to AT with a higher difference in urban points. It should also be highlighted that the research enabled the analysis of temperature variation in the studied area through the integration of field data and remote sensing.

Keywords: Thermal images, Urban heat islands, Image correction, Field experiment.

INTRODUÇÃO

As temperaturas mais elevadas no meio urbano quando comparadas com as áreas rurais são denominadas de “ilhas de calor urbanas” (Oke, 1978; Gartland, 2010). O fenômeno pode causar o desconforto térmico na população comprometendo à saúde e rendimento no trabalho e atividades físicas (Santamouris et al., 2015; Radhi et al., 2013; Gago et al., 2013). Alguns trabalhos foram desenvolvidos com intuito de verificar alternativas para mitigar os efeitos das ilhas de calor como também investigações sobre o conforto térmico (Gobo et al., 2018; Buriol et al., 2015; Steeneveld et al., 2014; Santamouris, 2014).

Neste aspecto, a busca por caracterização desses ambientes pode demonstrar as principais peculiaridades de cada situação no meio rural (como áreas vegetadas, áreas com solo exposto) e no meio urbano – áreas residenciais, áreas centro-comercial. Aliado a isto, existem os produtos e técnicas de sensoriamento remoto que, além de possibilitarem uma análise espacial também disponibilizam informações sobre a temperatura de superfície das diferentes coberturas terrestres a partir de sensores do infravermelho termal. Como observado em pesquisas conduzidas por Streutker (2002), Yuan e Bauer (2006), Radhi et al. (2013), Yu et al. (2014), Trindade et al. (2017).

Atualmente, é possível adquirir imagens termais a partir do sensor TIRS a bordo do satélite Landsat 8 e estes produtos já estão disponibilizados em resolução espacial de 30 metros

(reamostradas) para coincidir com as demais bandas. Problemas relacionados à calibração radiométrica do sensor TIRS devido a interferências de luz difusa foram identificados desde seu lançamento (REUTER et al., 2015; MONTANARO, 2014). No entanto, o problema foi parcialmente solucionado a partir do algoritmo desenvolvido por Montanaro et al. (2015) que foi implementado nas imagens a partir do início de 2017. A aplicação das correções garantiu a redução dos erros de calibração de $2,1^{\circ}\text{K}$ para $0,3^{\circ}\text{C}$ na banda 10, já a banda 11 ainda não é recomendada para utilização (Gerace & Montanaro, 2017).

Diante disso, cabe destacar a importância de estudos relacionados a temperatura nos ambientes urbanos como também as características rurais dos municípios. Outro fato interessante é a análise da temperatura a partir da integração de dados de campo (pontuais) e imagens termais. Desta forma, parte-se da hipótese que a análise integrada do meio rural e urbano a partir de dados de campo e imagens orbitais para as quatro estações do ano possibilitam diagnósticos das principais diferenças entre estes ambientes, bem como apontar as características mais relevantes.

Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa foi verificar as diferenças térmicas entre o espaço urbano e o entorno rural de Santa Maria – RS no período de março/2017 a março/2018 a partir de pontos fixos de coletas de dados e imagens orbitais. Conforme Buriol et al. (2015), as condições meteorológicas na região de Santa Maria variam muito ao longo do ano, até mesmo ao longo do dia o que exige uma rápida adaptação por parte dos seus habitantes. Neste sentido, pesquisas sobre a variação espacial e temporal da temperatura podem servir de base para estudos das condições do conforto térmico.

ÁREA DE ESTUDO

O foco deste estudo são áreas urbanas e rurais do município de Santa Maria-RS, o qual está localizado no centro do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1) e possui uma área territorial de, aproximadamente, 1781 Km^2 e população estimada no último censo (2010) de 261.000 habitantes

(IBGE, 2018). O município divide-se em 10 distritos, 9 rurais e 1 distrito sede. O perímetro urbano possui aproximadamente 126 Km² onde residem 95% da população do município (IBGE, 2018).

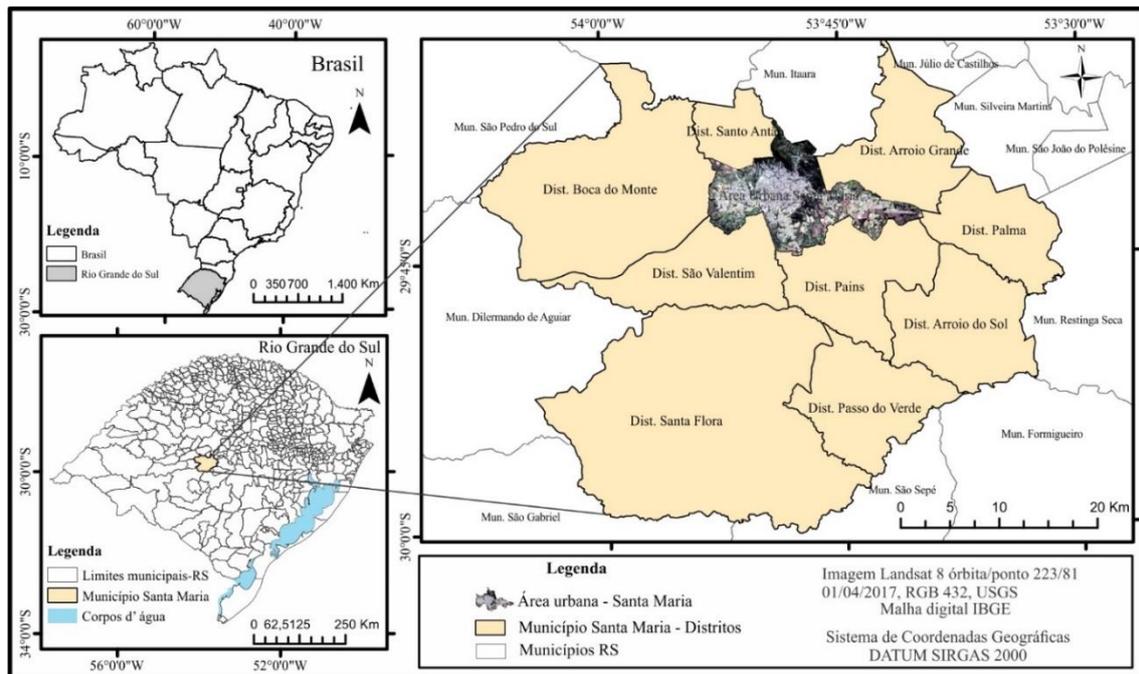


Figura. 1- Localização da área de estudo Santa Maria – RS.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O município de Santa Maria situa-se em uma área de transição geomorfológica entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Central do Rio Grande do Sul, apresentando formação vegetal de campos e florestas- Mata Atlântica (Ross, 2001; Marchiori & Noal Filho, 2009). O clima é caracterizado, pela classificação de Koppen, como tipo Cfa, ou seja, subtropical úmido com verões quentes e é considerado um dos locais mais quentes do estado devido sua continentalidade e baixa altitude (Heldwein et al. 2009).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da presente pesquisa foram utilizados: dados de campo que corresponderam aos registros de temperatura do ar em diferentes pontos distribuídos no meio urbano e rural de Santa Maria; dados de quatro imagens da plataforma Landsat 8; dados vetoriais – arquivos .shp com limites urbano e rural da área de estudo disponibilizados pelo IBGE; e *softwares* Envi e QGIS para o processamento e

representação dos dados. Desta forma, os procedimentos metodológicos foram estabelecidos em duas etapas principais: implantação de pontos fixos para coleta de dados (experimento de campo) e processamento das imagens orbitais.

IMPLANTAÇÃO DE PONTOS FIXOS PARA COLETA DE DADOS

O experimento de campo correspondeu na aquisição de dados de temperatura do ar (Tar) a partir da implantação de 10 pontos fixos distribuídos na área de estudo. Neste sentido, foram adquiridos 10 *data loggers* denominados *Tag Temp Stick* da marca *Novus* (Figura 2 a). O *Tag Temp Stick* possui um sensor interno que mede a temperatura ambiente (ar) e grava os valores em memória eletrônica. Os valores registrados podem ser enviados a um computador por meio do *software LogCharte – II* (Figura 2 b). O *LogChart* foi adquirido juntamente com o *data logger* e é uma ferramenta utilizada para a configuração do registrador, por exemplo início e intervalo de tempo de aquisições de dados.

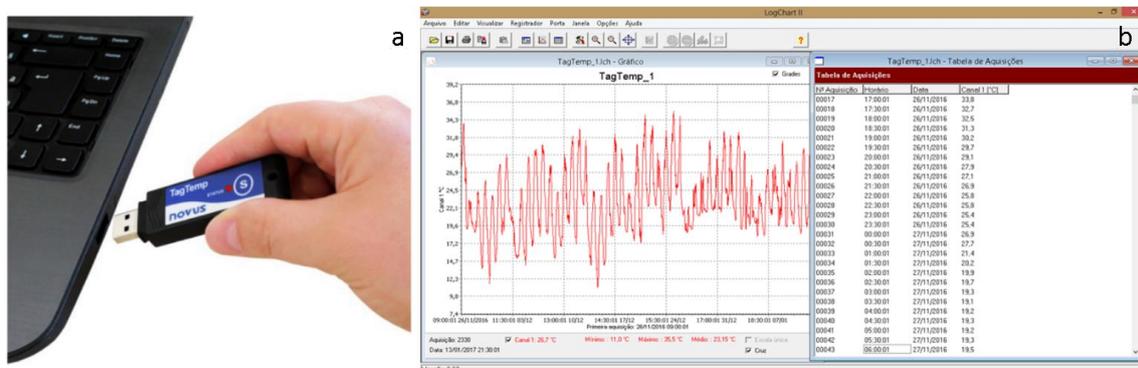


Figura. 2 - a: data logger; b: interface com o computador.

Fonte: Manual Novus.

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM) a temperatura do ar pode ser medida por um termômetro exposto ao ar em um local protegido da incidência solar direta (WMO, 2008). Então, faz-se necessário o uso de abrigo para proteger o registrador de temperatura, pois além da radiação direta, o equipamento também fica protegido da chuva e ventos fortes que podem danificá-lo. Como o custo de abrigos meteorológicos é elevado optou-se por construir um abrigo de baixo custo baseado em modelos utilizados em estações meteorológicas automáticas e adaptados para o *data logger*

adquirido para esta pesquisa. Primeiramente foi consultado o laboratório de Micrometeorologia da UFSM para verificar um modelo de abrigo bem como posteriores aferições dos dados entre os abrigos construídos e o modelo. O material escolhido (plafons) já foi utilizado para construção de abrigos em micro estações meteorológicas. Os materiais utilizados apresentam-se no quadro 1.

Material	Fotografia
Plafons brancos com proteção UV – para cada abrigo foram utilizados 8 plafons, o primeiro foi adaptado com uma válvula para lavatório que serviu para acomodar o data logger dentro do abrigo. Os dois últimos foram fechados.	
Barra roscada 4 mm de diâmetro – para cada abrigo foram utilizadas 2 barras de 25 cm de comprimento.	
Roscas para barra roscada e arruelas – para cada abrigo foram utilizadas 40 roscas e 30 arruelas.	
Mangueira branca cortadas em 1 cm e 5 cm – para cada abrigo foram utilizados 14 pedaços de 1 cm de mangueira e 2 de 4 cm.	

Quadro. 1 - Materiais utilizados na construção de abrigos para os data loggers.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o experimento de campo foram construídos 10 abrigos de 18 cm de altura cada, diâmetro externo de 13,5 cm e interno de 4,5 cm e os plafons foram separados a cada 1 cm (Figura 3a). Em cada abrigo foi anexado a um suporte que serviu para fixá-lo no local desejado, neste caso, em postes de madeira (Figura 3 b). Cada abrigo ficou a uma distância de 1,7 metros seguindo as normas de meteorologia (WMO, 2008) para instalação de estações meteorológicas que citam entre 1,5 a 2 metros do solo.

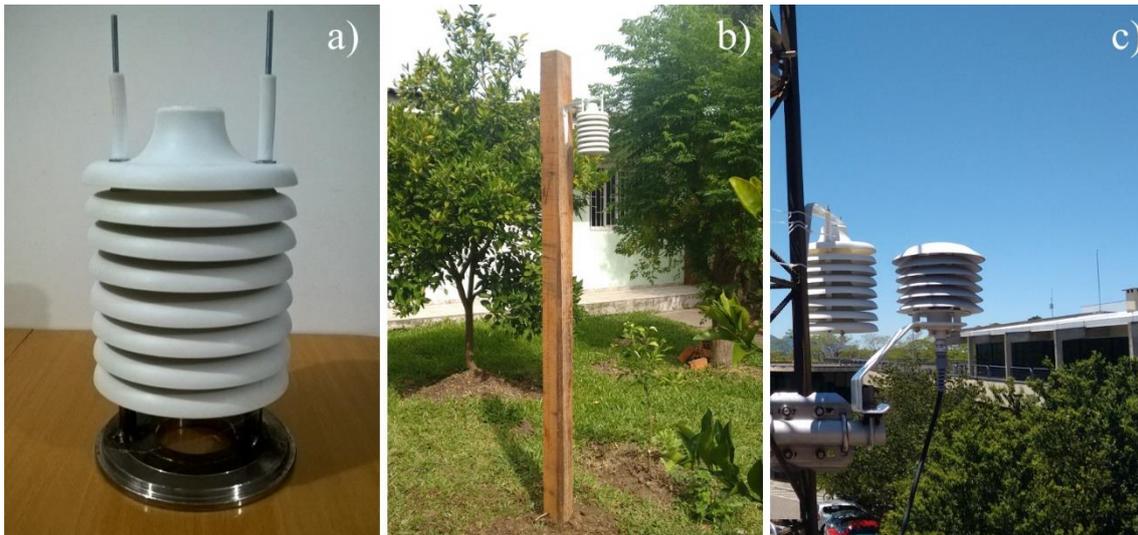


Figura. 3 - Abrigo construído: a) abrigo pronto no suporte; b) abrigo instalado em campo; c) aferição entre abrigos.
Fonte: acervo dos autores, 2016.

Quanto à aferição da eficiência dos abrigos construídos, realizou-se a comparação entre os valores de temperatura registrados por dois *data loggers* adquiridos para esta pesquisa, um dentro do abrigo modelo e o outro no abrigo construído (Figura 3 c) em um período de 24 horas com intervalo de aquisição de 1 minuto. Sequencialmente os dados foram comparados e calculados o erro médio absoluto (EMA) (Equação 1) entre os registros. O EMA é utilizado em situações de comparação de dados observados em campo e dados previstos por modelos, utilizado em trabalhos anteriores como Lopes *et al.* (2014), quanto mais próximo de zero o valor do EMA melhor o ajuste entre os dados.

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X'_i - X_i| \quad (1)$$

Onde: X_i - dados referência (*data logger* T1 e abrigo modelo); X'_i - dados medidos (*data loggers* T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10) e abrigo construído; N - número pares de pontos utilizados (comparação entre *data loggers* 144; comparação entre abrigos 1440).

Os *data loggers* foram distribuídos da seguinte forma: cinco na área urbana e cinco em áreas rurais de Santa Maria (Figura 4). Para a escolha dos locais em que os instrumentos seriam instalados considerou-se 3 critérios: melhor distribuição espacial (regiões leste, oeste, norte, sul e centro); características da área (residencial com vegetação, residencial pouco arborizado e bairro centro-comercial); e questões relacionadas à segurança de cada local. As características de cada área podem ser observadas no quadro 2.

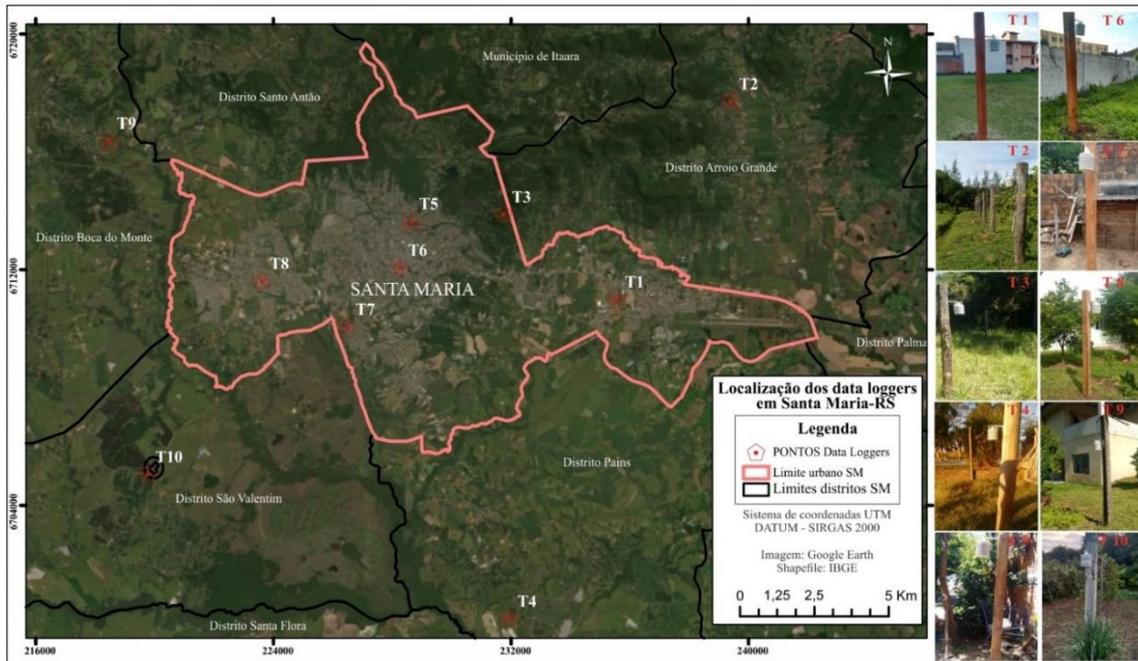


Figura. 4 - Localização dos pontos fixos em áreas urbanas e rurais de Santa Maria - RS.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ponto	Localização	Bairro/região ou distrito	Características	Altitude (m)
T1	Área urbana	Bairro Camobi, região leste.	Residencial com pouca arborização e próximo à edificação.	108
T2	Área rural	Distrito Arroio Grande, região nordeste.	Propriedade com arborização e distante de edificações.	116
T3	Área rural	Bairro Campestre do Menino Deus, região nordeste.	Propriedade com arborização expressiva e distante de áreas construídas.	253
T4	Área rural	Distrito Pains, região sudeste.	Propriedade rural em local gramado e sem residências ao redor	74
T5	Área urbana	Bairro Itararé, região norte.	Residencial com arborização expressiva.	130
T6	Área urbana	Bairro Centro.	Centro-comercial com muitas edificações ao redor.	144
T7	Área urbana	Bairro Urlândia, região sul.	Residencial com pouca arborização.	78
T8	Área urbana	Bairro Juscelino Kubistchek, região oeste.	Residencial, local gramado com arborização.	100
T9	Área rural	Distrito Boca do Monte, região oeste).	Propriedade rural, local gramado sem arborização ao redor.	122
T10	Área rural	Distrito São Valentim, região sudoeste.	Propriedade rural, local gramado com pouca arborização ao redor.	145

Quadro. 2 - Característica dos pontos fixos.

Os *data loggers* registraram a temperatura a cada 30 minutos, totalizando 48 registros por dia de março de 2017 a março de 2018. Os dados foram coletados uma vez por estação e organizados de forma que facilitasse a extração de informações e análises. No trabalho de campo (Figura 5) os dados foram enviados para o computador e posteriormente cada *data logger* foi reprogramado para novos registros. Em trabalho de Collischonn (2016) também foram distribuídos sensores de temperatura, na área urbana de Pelotas – RS com intervalo de registro de dados a cada 30 minutos.



Figura. 5 - Trabalho de campo para coleta dos registros de cada *data logger*.

Fonte: acervo dos autores, 2017, 2018.

PROCESSAMENTO DAS IMAGENS ORBITAIS

As imagens orbitais consistiram em 4 produtos da plataforma Landsat 8 órbita/ponto 223/81 dos quais utilizaram-se as bandas do infravermelho termal em temperatura de brilho (Tbt - banda 10), do visível (bandas 2, 3, 4) e infravermelho próximo (banda 5) em reflectância de superfície, disponíveis na plataforma *Earth Explorer* (<https://lpcsexplorer.cr.usgs.gov/>). É importante destacar que as bandas termais já estão reamostradas com resolução espacial de 30 metros para que coincidisse com as demais bandas. A escolha das imagens levou em consideração cenas sem nuvens e uma por estação do ano referentes às seguintes datas: 01/04/2017 – outono, 07/08/2017 – inverno, 11/11/2017 – primavera, e 15/02/2018 – verão. O processamento das imagens foi realizado nos *softwares* Envi e QGIS seguindo duas etapas principais: correção de imagens termais para temperatura de superfície e fatiamento das imagens em classes de temperatura.

A partir das imagens de temperatura de brilho já é possível verificar a variação da temperatura em diferentes locais da imagem. No entanto a Tbt considera que todos os tipos de superfícies imageadas

comportam-se como um corpo negro, ou seja, considera que a emissividade dos materiais é 1. Sabe-se que na natureza, os diversos tipos e coberturas existentes não comportam-se como um corpo negro, então Van de Griend & Owe (1993), Valor & Caselles (1996) e Zhang et al. (2006) destacam a importância da correção das imagens com o valor de emissividade de cada alvo. Os processos de correção da imagem T_b para temperatura de superfície (TS) foram realizados no *QGIS*, o qual apresenta o complemento *Land Surface Temperatura* (LST) desenvolvido por Ndossi & Avdan (2016). O método de correção escolhido é denominado de “*Planck Equation*” no referido complemento (Equação 2), pois os autores observaram que o método apresentou os melhores resultados para imagens Landsat 8. Os dados de entrada foram imagens de T_b e emissividade.

A imagem de emissividade foi calculada no mesmo complemento com os valores de NDVI, metodologia desenvolvida por Zhang et al. (2006) e implementada no LST. Segundo Ndossi & Avdan (2016), as imagens Landsat 8 corrigidas pelo método *Planck Equation* exibiram os melhores resultados quando comparadas com medidas de temperatura *in situ*. As imagens de NDVI também foram geradas no LST (Equação 3). Assim, as imagens de saída foram de temperatura de superfície em graus celsius (°C), as quais foram submetidas à ferramenta “*Raster Color Slices*” do *Envi* e classificadas em 11 classes de temperatura com intervalo de 3°C.

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{\alpha}\right)^4 \ln \epsilon} \quad (2)$$

Onde T_b = temperatura de brilho ou aparente registrada pelo sensor em Kelvin;

λ = comprimento de onda médio do infravermelho termal;

$\alpha = hc/K = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$, onde:

K = constante de Stefan-Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

h = constante de Planck ($6.28 \times 10^{-34} \text{ J/s}$)

c = velocidade da luz ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$\ln \epsilon$ = logaritmo natural da emissividade da superfície.

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (3)$$

Onde, ρ_{ivp} = reflectância no infravermelho próximo, ρ_v = reflectância no vermelho.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção compreende a apresentação dos principais resultados obtidos na presente pesquisa que foram organizados em 4 fases: aferição dos abrigos para o experimento de campo; temperatura do ar (março/2017 a março/2018); temperatura do ar por estação do ano; temperatura do ar por período do dia; e temperatura de superfície com imagens termais.

AFERIÇÃO DOS ABRIGOS

As estatísticas calculadas para os dados registrados no *data logger*/abrigo modelo foram similares às informações geradas com os dados do *data logger*/abrigo construído (Tabela 2). O erro médio absoluto para a comparação não foi superior à 0,08°C, apresentando resultado satisfatório para utilização dos abrigos. Em trabalho anterior, Amorim et al. (2015) construíram abrigos meteorológicos, mas com o material PVC e os resultados encontrados demonstraram similaridade entre a comparação dos dados obtidos com sensores nos abrigos PVC e dados registrados pela estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela CIII 1 - Estatística descritiva da temperatura nos data loggers em abrigos diferentes.

Tar °C	<i>Data logger no abrigo modelo</i>	<i>Data logger no abrigo construído</i>
Máx	32,40	32,40
Mín	12,50	12,50
Média	22,54	22,53
Dpad	6,14	6,19

Fonte: Elaborado pelos autores.

TEMPERATURA DO AR (março/2017 a março/2018)

Em uma análise geral, verificou-se que a temperatura do ar no município variou basicamente de 11°C a 37°C em mais de 500 ocorrências para a série estudada (Figura 6). No entanto, em algumas áreas ocorreram temperaturas inferiores à 2°C e superiores à 42°C, fato explicado pelas diferentes características espaciais de cada ponto de registro. O intervalo de maior ocorrência para todos os pontos correspondeu à temperatura de 18°C a 23°C. A variação diária da temperatura (amplitude térmica diária) apresentou valor médio anual de 11°C, com as menores amplitudes na estação de inverno e maiores no verão o que reitera as afirmações de Heldwein et al. (2009).

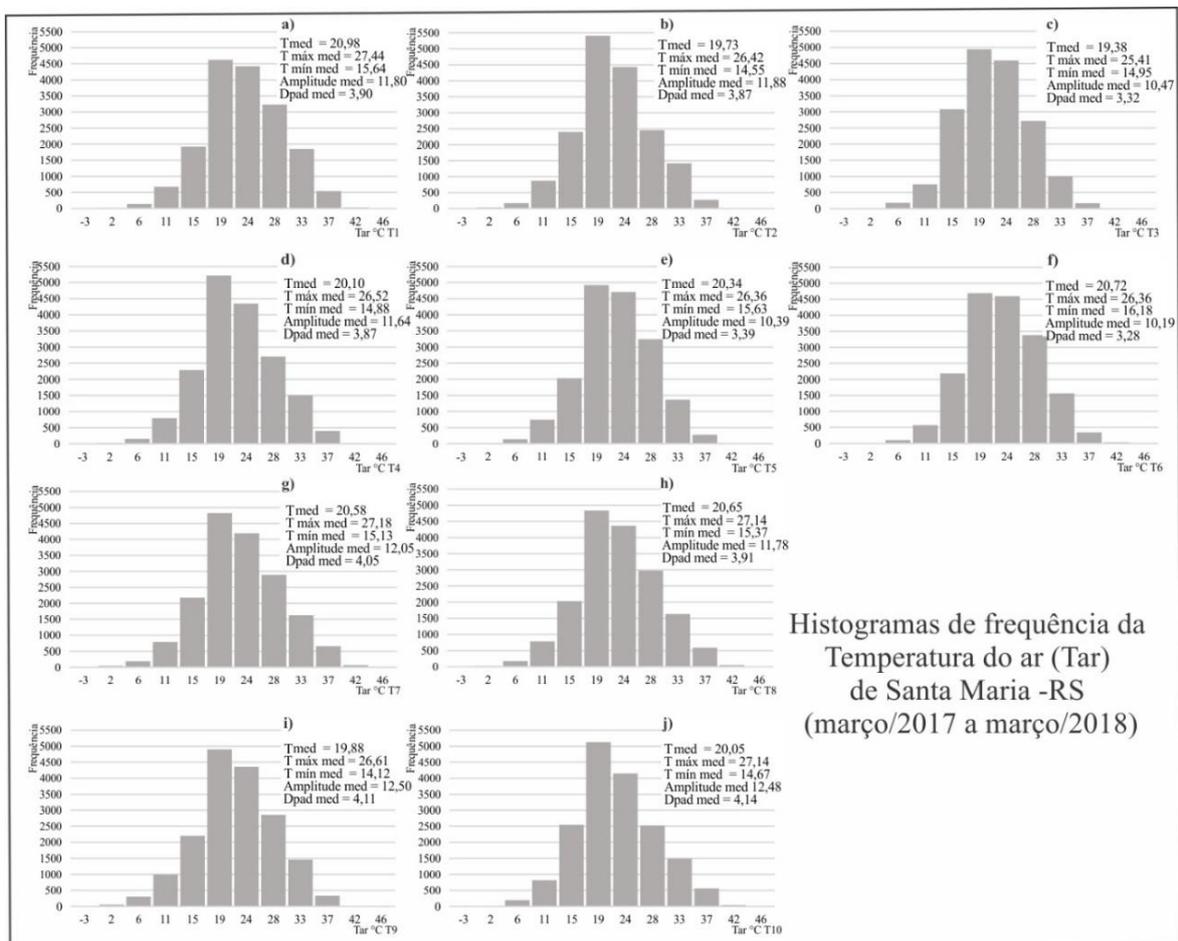


Figura. 6 - Histogramas de frequência da temperatura do ar de cada ponto durante o período março/2017 a março/2018. Fonte: Elaborado pelos autores.

A temperatura média dos pontos localizados em área urbana (T1, T5, T6, T7 e T8) foi de 20,6°C, com destaque para os pontos T1 (residencial sem arborização) e T5 (residencial com densa arborização) que registraram maior e menor temperatura média respectivamente. Nos pontos localizados em área rural (T2, T3, T4, T9 e T10) a temperatura média foi de 19,8°C, sendo os menores valores registrados em T3 (maior altitude e com densa vegetação) e maiores em T4 (área com vegetação rasteira e períodos de solo exposto). Cabe destacar que no ponto T3 a média das máximas foi a menor, o que pode ser explicado pelas características diferenciadas do local com arborização expressiva e maior altitude (região norte da cidade). Neste caso, o cenário encontrado reitera o que foi descrito por Sartori (2016), que os valores mais baixos de temperatura são registrados ao norte de Santa Maria, área localizadas no Planalto Meridional Brasileiro, já as temperaturas mais altas são observadas na área da Depressão Periférica, onde a maior parte da área urbana está inserida.

TEMPERATURA DO AR POR ESTAÇÃO DO ANO

Outono

Ao analisar a variação da temperatura para a estação do outono nos pontos localizados em área urbana verificou-se que os valores aproximados das médias ficaram entre 17°C e 18°C, com mínimas entre 12°C e 14°C e máximas de 22°C a 23°C (Figura 7). As localidades rurais apresentaram temperaturas médias aproximadas entre 16°C e 17°C, com valores mínimos de 12°C a 13°C e máximos de 21°C a 23°C. Os pontos rurais apresentaram amplitude térmica (média) superior à amplitude dos pontos urbanos, entretanto, a diferença entre as temperaturas médias dos dois ambientes foi de 0,5°C (urbano – 17,91°C e rural – 17,37°C).

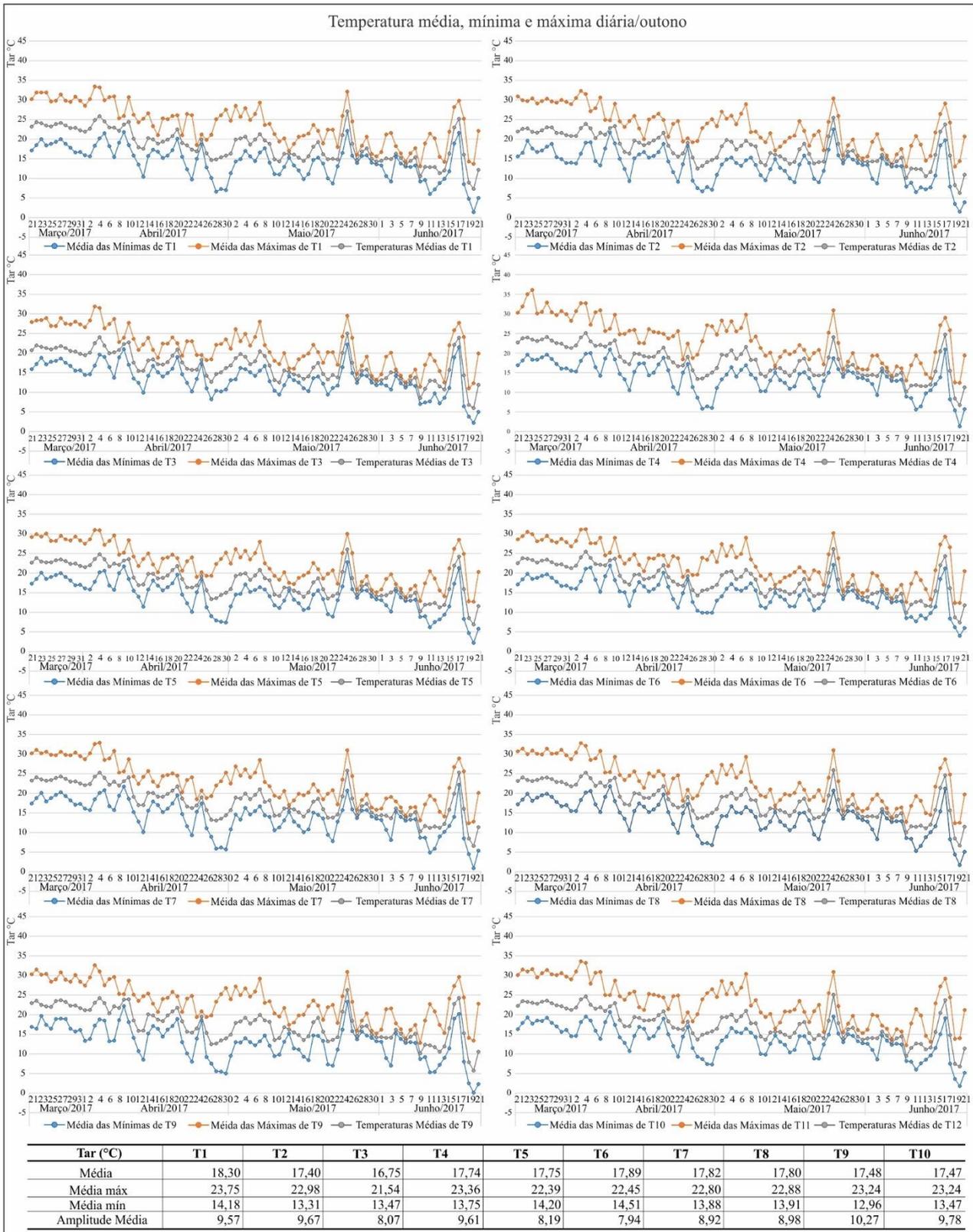


Figura. 7 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação outono/2017 em Santa Maria – RS.

Fonte: Elaborado pelos autores.

De forma geral, maioria dos pontos apresentou 47 dias com temperaturas superiores às médias das máximas. Em constatações mais pontuais, verificou-se que a maior temperatura média e média das máximas ocorreu no ponto T1, localizado em área urbana próximo às edificações e sem arborização. Em contrapartida, os menores valores de temperatura média e média das máximas foram registrados em T3 caracterizado por expressiva arborização, distante de áreas construídas e localizado em altitude mais elevada que os demais. O ponto T1 apresentou a maior diferença quando comparado com a média dos pontos rurais, sendo superior em média entre $0,93^{\circ}\text{C}$ e $4,3^{\circ}\text{C}$. Já o ponto T5 foi o que apresentou a menor diferença em relação a temperatura média dos pontos rurais, com valor superior em $0,38^{\circ}\text{C}$. Quando os dados dos pontos urbanos foram comparados com o ponto T3, localizado em área bastante arborizada e em altitude maior, verificou-se que as diferenças foram ainda mais significativas, em relação a T1 a diferença média foi de $1,5^{\circ}\text{C}$.

Inverno

Assim como no outono, o inverno também apresentou temperatura média entre 17°C e 18°C e média das mínimas de 12°C a 14°C para as localidades urbanas. Em contrapartida as médias das máximas foram superiores nesta estação, próximas a 24°C e 25°C (Figura 8). Tal fato pode ser justificado pela ocorrência de registros de temperatura superiores à 35°C . Para os pontos localizados em área rural a temperatura média para o inverno ficou próxima dos 17°C , com intervalos de mínima entre 11°C e 13°C e máxima de 23°C a 24°C .

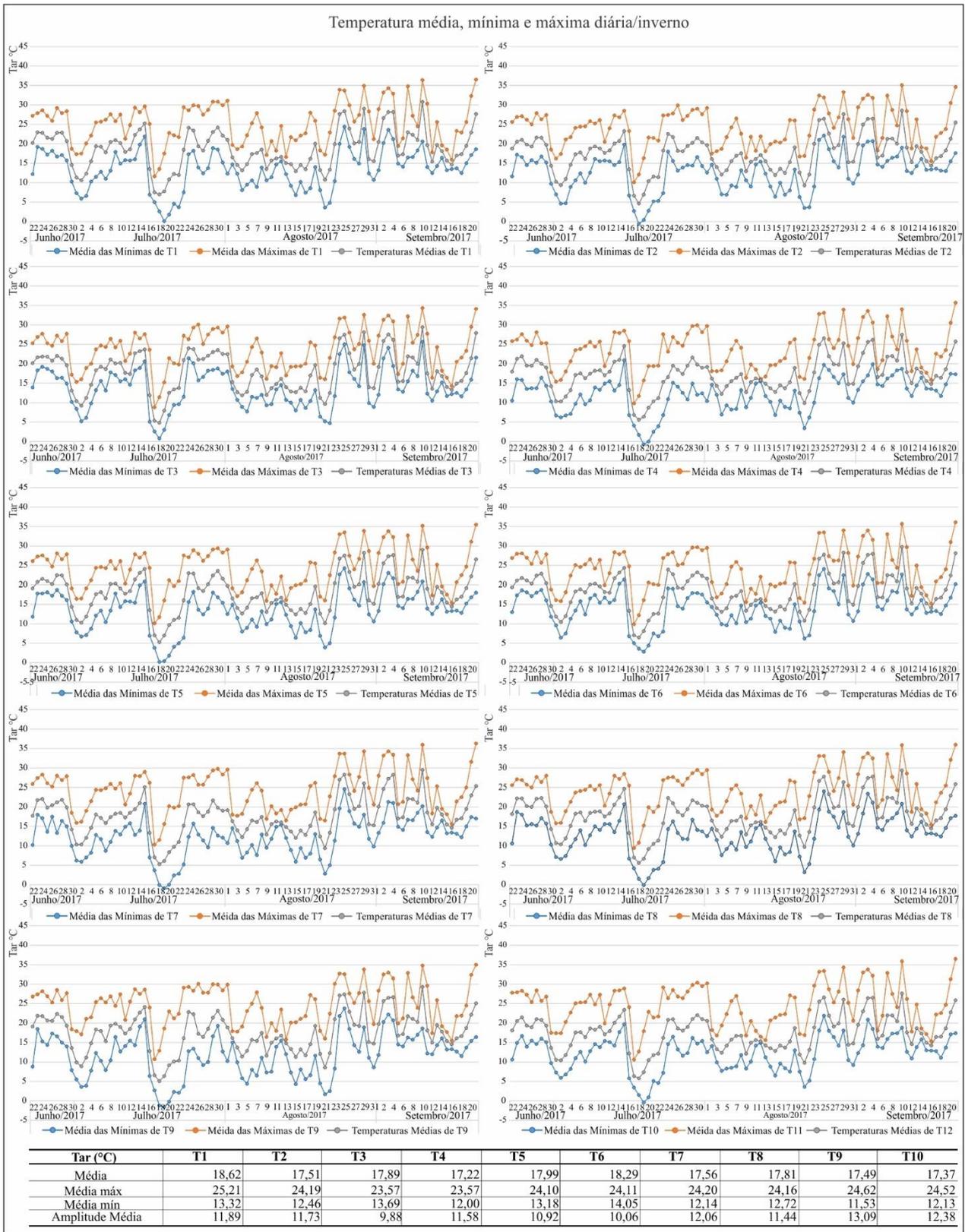


Figura. 8 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação inverno/2017 em Santa Maria – RS.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

Diferente do outono, o inverno apresentou dias com temperaturas superiores a 35°C e inferiores a 5°C, justificando também sua amplitude térmica superior ao outono. As temperaturas médias e máximas mais elevadas foram registradas na área urbana, no ponto T1. Já as menores temperaturas ocorreram em área rural, nos pontos T4 e T3. A diferença entre as temperaturas médias do urbano e rural foi de 0,5°C, com maior média ainda nos pontos urbanos. Ao comparar todos os pontos urbanos com a média dos pontos rurais, constatou-se que a maior diferença foi registrada entre T1 e os pontos rurais, apresentando em média 1,12°C a mais, já as menores diferenças foram encontradas nos pontos T7 e T8.

Primavera

Na primavera, como o esperado, as temperaturas apresentaram-se mais elevadas em relação às estações de outono e inverno (Figura 9). Nos pontos localizados em área urbana, as temperaturas médias ficaram entre 21°C e 22°C, média das mínimas de 15°C a 16°C e máximas de 27°C a 29°C. Nas áreas rurais os valores de temperatura registrados na primavera também foram inferiores aos da área urbana e as temperaturas médias foram de 20°C a 21°C, com mínimas de 14°C a 15°C e máximas de 26°C a 28°C. A amplitude térmica dos dois ambientes foi próxima, com diferença de 0,3°C, no entanto, a diferença entre as médias dos pontos rurais e urbanos foi de 1,06°C, apresentando a maior diferença em relação ao outono e inverno.

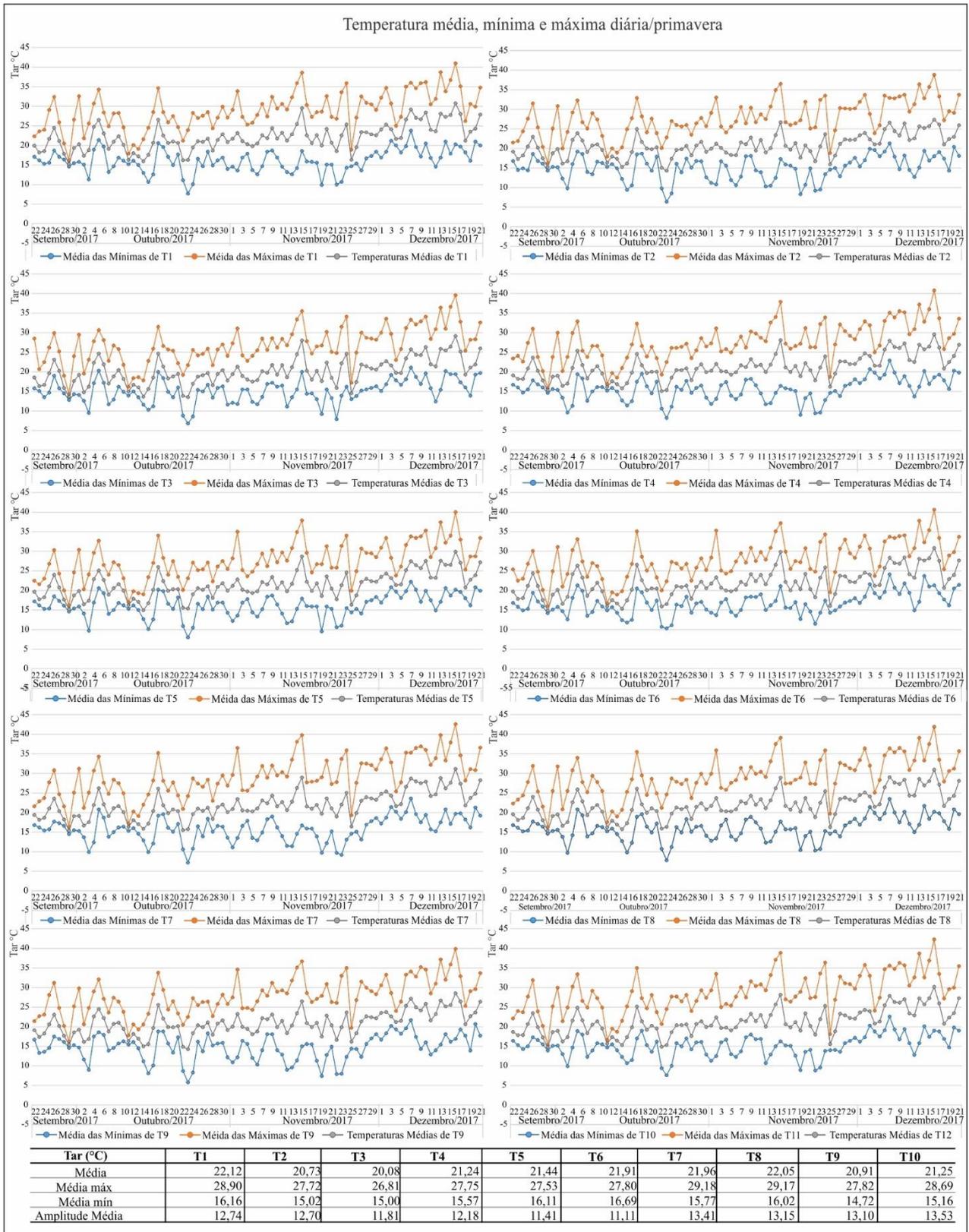


Figura. 9 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação primavera/2017 em Santa Maria – RS.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As temperaturas mais elevadas foram, novamente, verificadas em áreas urbanas. A maior temperatura média foi registrada em T1 e maiores médias das máximas em T7 e T8. Já os menores valores de temperatura média e média das máximas foram registrados em T3, maior altitude e arborizado. Comparando-se os valores de temperatura dos pontos urbanos e a média dos rurais, identificou-se que as diferenças variaram de $1,28^{\circ}\text{C}$ (T1 x Trurais) e $0,6^{\circ}\text{C}$ (T5 x Trurais), no primeiro caso, com maior diferença, deve-se ao fato de T1 estar localizado em área urbana com muitas residências, já no segundo caso, T5 está localizado em área urbana com arborização. Quando verificadas as diferenças dos pontos urbanos em relação apenas a T3, identificou-se que as diferenças foram ainda maiores, superiores a 2°C em T1.

Verão

A temperatura média para a estação do verão no meio urbano concentrou-se no intervalo de 24°C a 25°C , com média das mínimas de 18°C a 19°C e média das máximas próximas a 30°C e 32°C (Figura 10). Nos pontos localizados em áreas rurais a temperatura média variou entre 23°C e 24°C , média das máximas de 29°C a 32°C e média das mínimas entre 17°C e 18°C . Nesta estação foram verificados os maiores valores de amplitude térmica nos pontos urbanos e rurais, bem como a maior diferença entre as temperaturas médias destes dois ambientes ($1,17^{\circ}\text{C}$).

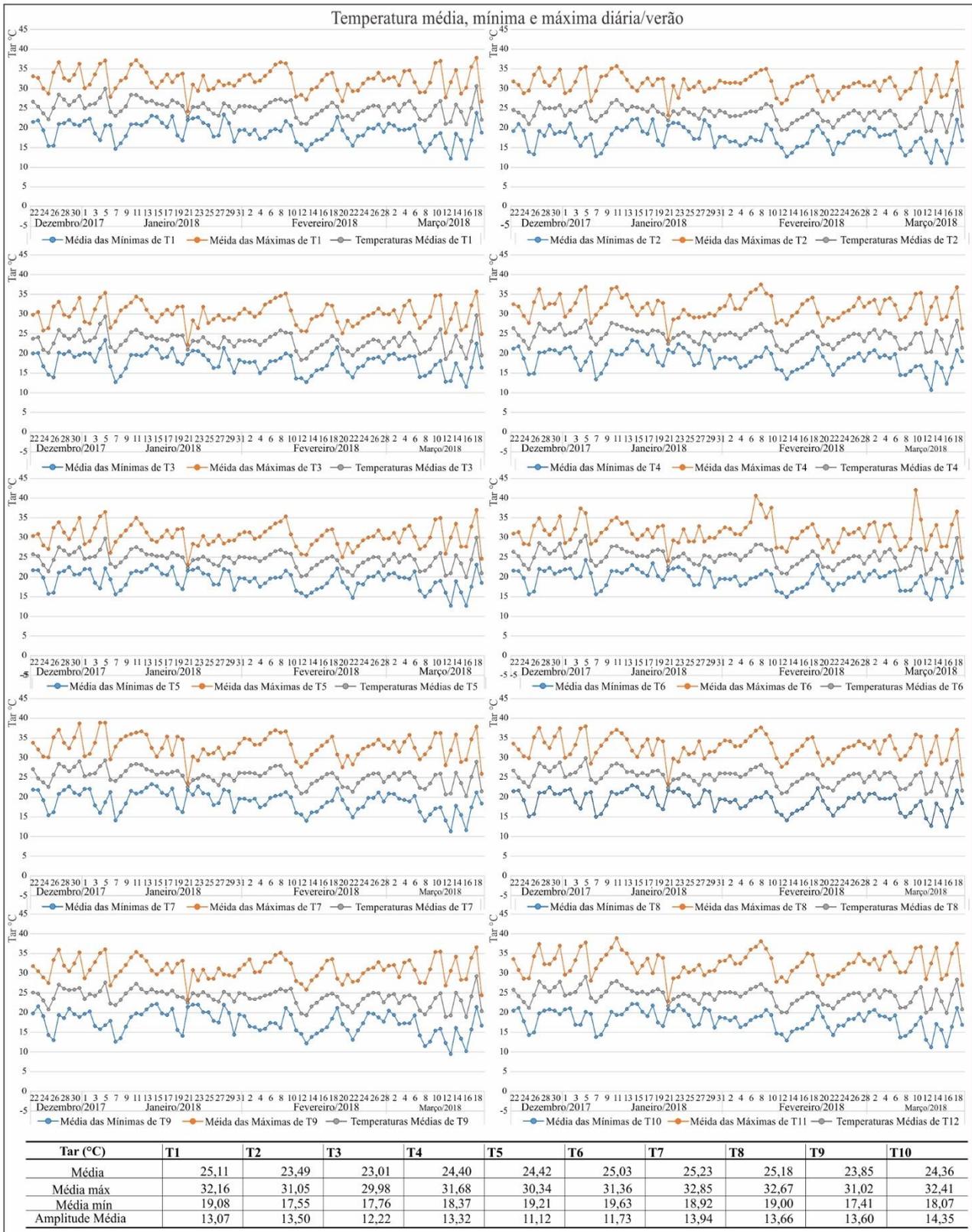


Figura. 10 - Temperatura do ar média, mínima, máxima para a estação verão/2017/2018 em Santa Maria – RS.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

A maior temperatura média e média das máximas ocorreu no ponto T7 (urbano residencial). Já a maior média das temperaturas mínimas foi registrada em T6 (centro-comercial). Em contrapartida, os menos valores de temperatura média e média das máximas foram registrados em T3 (rural com arborização e maior altitude). Assim como nas demais estações, verificou-se que as diferenças entre os pontos urbanos e rurais ainda continuaram superiores quando verificados T1 e a média do rural, em relação a T3 chegou até 2,10°C de diferença.

Em trabalho anterior, Yan e Bauer (2006) encontraram diferenças ainda maiores (de 24°C) entre os ambientes urbanos e rurais em cidades da região Metropolitana de Minnesota para a estação do verão. Neste caso, comprova-se o quanto a presença de vegetação pode contribuir para a amenização da temperatura nas áreas urbanas, fato que deve ser levado em consideração pelos gestores públicos. De acordo com Alves (2012), quanto ao crescimento das cidades de porte médio, Santa Maria é exemplo em que a vegetação urbana é suprimida para dar lugar as edificações.

TEMPERATURA DO AR POR PERÍODO DO DIA

Na estação do outono as menores temperaturas, de modo geral, ocorreram próximo às 7:00 da manhã e as mais elevadas foram verificadas às 15:00 da tarde (Figura 11 – a). Dentre os pontos urbanos, o T6 registrou valores mais elevados que os demais nos períodos da madrugada e noite (ilhas de calor – região central) e o T1 no período da manhã e tarde. Em relação aos pontos das áreas rurais, o T4 registrou os maiores valores nos períodos da madrugada, tarde e noite, e T9 no período da manhã.

Assim como no outono, as temperaturas mínimas e máximas no inverno também foram registradas às 7:00 e 15:00 respectivamente, do mesmo modo as maiores temperaturas foram verificadas nos pontos urbanos (Figura 11 – b). Em relação à área urbana, os valores mais elevados para os períodos da madrugada e noite foi em T6 (ilhas de calor – região central), e no período da manhã e tarde em T1. Dentre os pontos das áreas rurais, o T3 registrou os maiores valores nos períodos da madrugada, manhã e noite, e T9 na tarde.

Na estação da primavera as menores temperaturas foram registradas, de modo geral, uma hora antes das estações do outono e inverno, às 6:00 da manhã, mas os valores mais elevados continuaram a ser verificados no período da tarde, próximo às 15:00 (Figura 11 – c). O ponto T6 registrou valores mais elevados que os demais nos períodos da noite e madrugada (ilhas calor – região central), o T1 no período da manhã e T7 no da tarde. Nas áreas rurais, o T4 registrou os maiores valores nos períodos da madrugada e noite, e T9 e T10 nos períodos da manhã e tarde, respectivamente.

A estação do verão, assim como na primavera, apresentou valores de temperatura máxima próximo às 15:00 e temperaturas mínimas às 6:00 da manhã (Figura 11 – d). Na área urbana, o ponto T6 registrou valores mais elevados que os demais nos períodos da madrugada e noite (ilhas calor – região central), o T1 no período da manhã e T7 no da tarde. Em relação aos pontos das áreas rurais, o T4 registrou os maiores valores nos períodos da madrugada e noite, e T9 e T10 nos períodos da manhã e tarde, respectivamente.

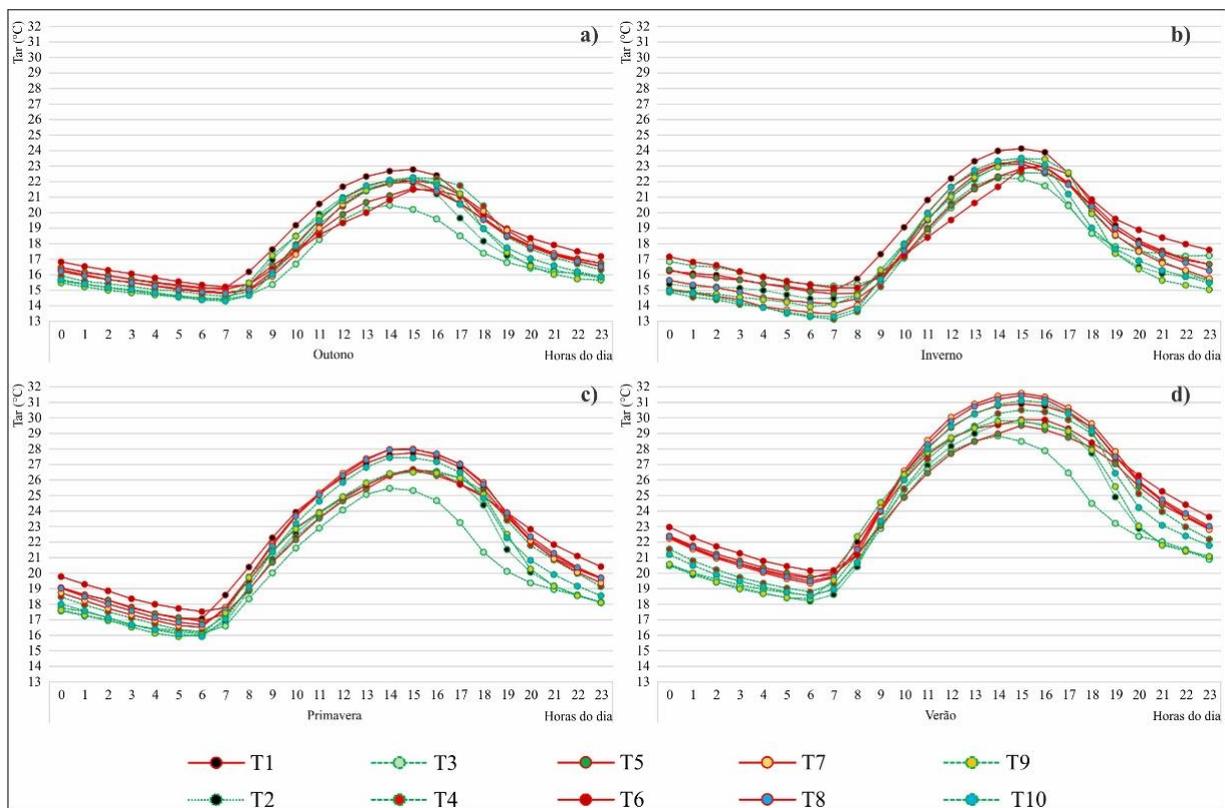


Figura. 11 - Temperatura do ar média para cada período do dia de março/2017 a março/2018 em Santa Maria – RS.
Fonte: Elaborado pelos autores.

De modo geral, pode-se dizer que em todas as estações do ano a temperatura em áreas urbanas foi superior do que as rurais, em contrapartida, nas estações mais quentes as diferenças foram mais significativas. No período da madrugada, a temperatura média na área urbana chegou a ser até $1,45^{\circ}\text{C}$ superior às áreas rurais no verão, na primavera a diferença foi de $1,06^{\circ}$, no inverno de $0,55^{\circ}$ e outono $0,70^{\circ}\text{C}$. No período da noite, a média da temperatura no ambiente rural foi menor $1,91^{\circ}\text{C}$ que o urbano no verão e na primavera a diferença foi de $1,54^{\circ}\text{C}$, já no outono e inverno essa diferença foi, no máximo, $1,07^{\circ}\text{C}$. Já nos períodos da manhã e tarde as diferenças entre as médias do urbano e rural foram, no máximo, até $0,85^{\circ}\text{C}$ para primavera e verão, e não ultrapassam $0,33^{\circ}\text{C}$ no outono e inverno.

Desta forma, foi possível pontuar dois aspectos interessantes, quanto às características de T6 e T3. O ponto T6, localizado em área centro-comercial, apresentou características de ilhas de calor urbanas, ou seja, maior aquecimento que os demais pontos durante a noite e madrugada. Conforme Oke (1978), ao substituir superfícies com vegetação por superfícies impermeáveis ocorre uma modificação do balanço energético nas cidades, ocasionado o aprisionamento da radiação. Neste caso, a temperatura continua mais elevada nas áreas centrais após o pôr do sol, configurando ilhas de calor urbanas. No trabalho realizado por Collischonn (2016), foi encontrada uma diferença de $5,4^{\circ}\text{C}$ entre as áreas centrais e periféricas de Pelotas para o período noturno.

Já o ponto T3, localizado em maior altitude e com densa arborização, apresentou as menores temperaturas no período da tarde, entretanto no inverno a temperatura foi superior aos demais pontos no período da manhã. Esta ocorrência pode ser justificada pelo fato que no inverno os dias com nevoeiro são mais frequentes e como o T3 foi instalado em maior altitude ficou livre deste fenômeno durante a manhã, enquanto os demais pontos estavam sob influência da condição meteorológica citada, justificando a maior temperatura em T3. De acordo com Heldwein et al. (2009) a disponibilidade da radiação solar na cidade é uma das menores do estado do Rio Grande do Sul e ocorrem elevada frequência de nevoeiros, aproximadamente, 92 dias por ano.

TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE (imagens termais)

Para a análise da temperatura de superfície (TS) foram consideradas quatro imagens termais uma para cada estação do ano para o período estudado. Neste sentido, na imagem do outono (Figura 12 - a) os valores de TS variaram de 17°C a 35°C. No entanto, o intervalo de 23°C a 26°C predominou em 50% da área estudada. Comparando-se áreas urbanas e rurais (Figura 12 – Gráficos 2 e 3), verificou-se o predomínio das classes 23°C a 26°C e 26°C a 29°C, no entanto, a primeira classe ocorreu com maior frequência no rural (mais de 50%) e a segunda, maior TS, no urbano (30%).

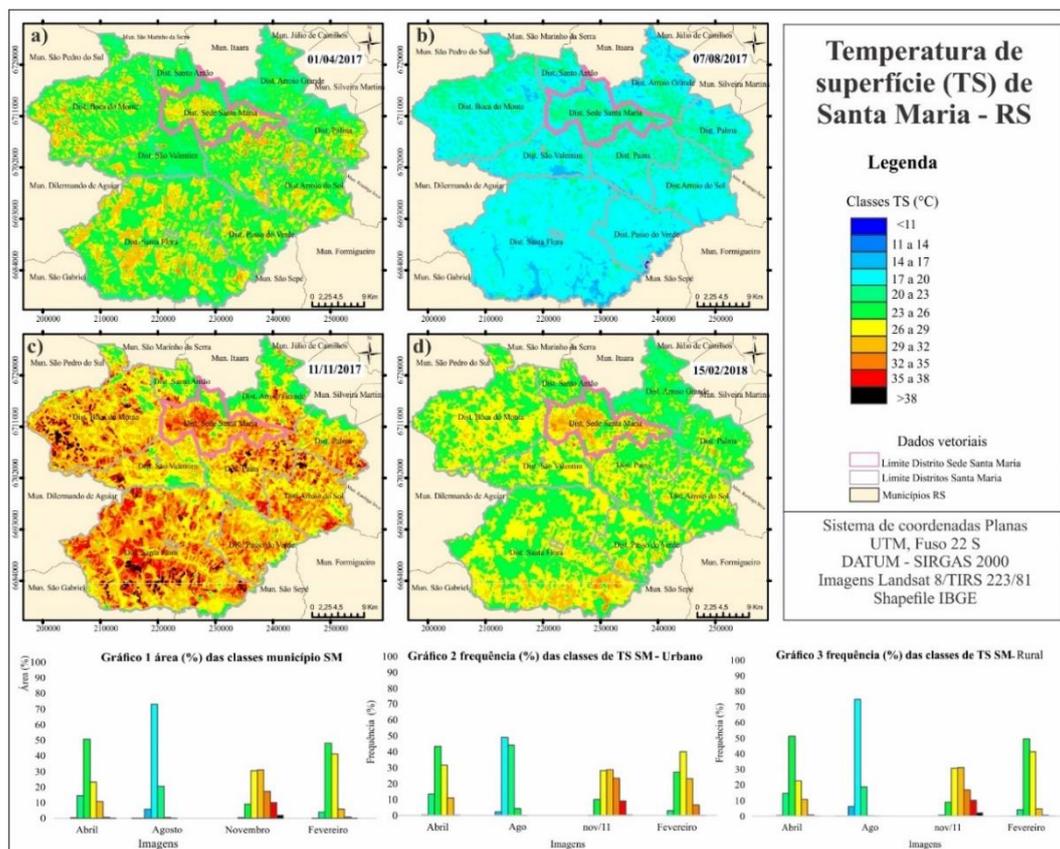


Figura. 12 - Temperatura de Superfície para as imagens de 01/04/2017, 07/08/2017, 11/11/2017 e 15/02/2018.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Na imagem do inverno (Figura 12 - b), constatou-se que os valores que mais ocorreram compreenderam o intervalo de 14°C a 23°C. Tanto em áreas urbanas como rurais, verificou-se o predomínio das classes 17°C a 20°C e 23°C a 26°C, porém, constatou-se que a primeira a primeira classe ocorreu com maior frequência no rural (mais de 70%) e a segunda (maior temperatura) no urbano (mais de 40%).

Na imagem da primavera (Figura 12 - c), verificou-se o predomínio da classe de 29°C a 32°C (30, 94%), seguida da classe 26°C a 29° em 30,45% da área. Para esta imagem, não verificou-se muitas diferenças entre a TS de áreas urbanas e rurais, entretanto, ocorreu um aumento da classe TS 32°C a 35°C nas áreas urbanas e temperaturas maiores que 38°C em áreas rurais. Este fato pode ser justificado pela ocorrência de solo exposto nas áreas rurais para esta época do ano, já que este uso assemelha-se ao comportamento espectral de áreas construídas.

Na imagem do verão (Figura 12 - d), constatou-se valores de TS variando entre 20°C a 35°C e as temperaturas que mais ocorreram foram entre 23° e 32°C, com predomínio das classes 23°C a 26°C (48%) e 26°C a 29°C (41,20%). Ao comparar a TS em áreas urbanas e rurais, verificou-se que no urbano a classe 26°C a 29°C ocorreu com maior frequência (40%), já no rural foi classe 23°C a 26°C (50%).

Ao comparar a temperatura de superfície (TS) e temperatura do ar (Tar) para as datas e horário das imagens, constatou-se que na maioria dos pontos TS foi superior que Tar e as maiores diferenças foram verificadas nos pontos localizados em área urbana (Figura 13). Já as menores diferenças foram encontradas nos pontos rurais, configurando, em alguns casos, Tar superiores que TS. De modo geral, a diferença média entre TS e Tar foi de 3,2°C, com mínima de 0,08°C no inverno (área rural) e máxima de 9,65°C na primavera (área urbana). Em estudo anterior, ao comparar as temperaturas do ar e de superfície em diferentes locais na Universidade da Califórnia, Guan (2011) verificou diferenças 8°C a 15°C para áreas construídas e diferenças inferiores a 1°C em áreas com gramado.

Para a imagem do outono, constatou-se que a diferença média entre as temperaturas TS e Tar foi de, aproximadamente, 2,40°C e a diferença máxima (6,24°C) foi no ponto T7(localizado em área urbana) e mínima de 0,27°C no ponto T9, área rural, (Figura 13 –a). Na imagem no inverno, verificou-se que a diferença média entre TS e Tar foi de 3,32°C, com diferença máxima de 7,45°C no ponto T6 e mínima (0,08°C) no T2 (Figura 13– b). Em relação à imagem da primavera, as diferenças entre TS e Tar foram maiores, com média de 4,10°C de diferença, mínima de 0,12°C no T10 e máxima de 9,65°C no T6 (Figura 13 – c). Na imagem do verão, constatou-se que a média das diferenças entre TS e Tar foi de 3,32°C, a diferença mínima foi no ponto T10 (0,10°C) e a máxima no ponto T8 (6,80°C).

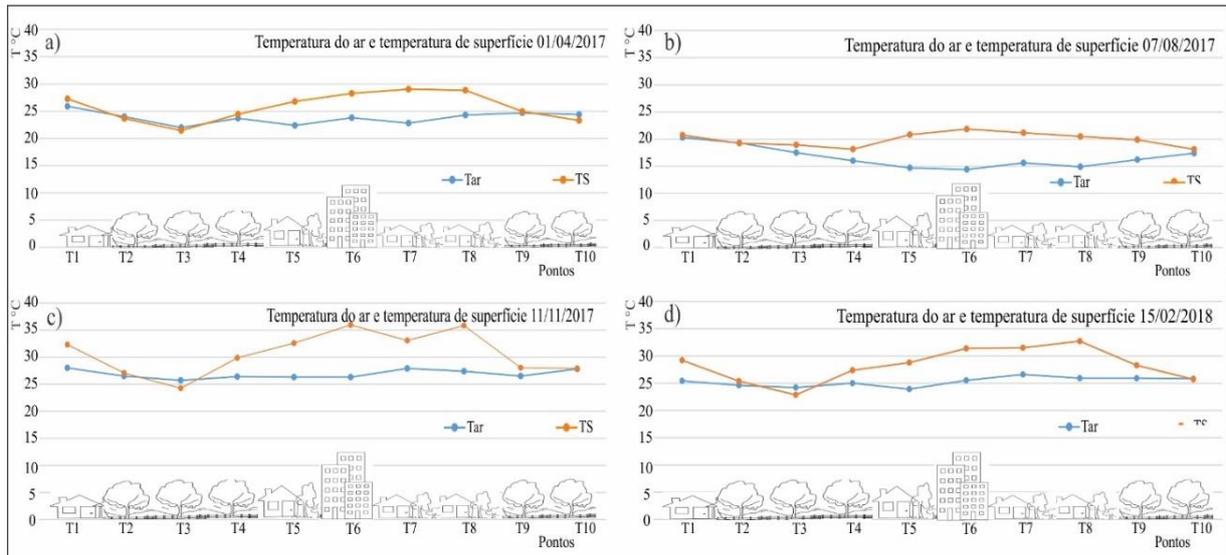


Figura. 13 - Comparação entre temperatura do ar (Tar) e temperatura de superfície (TS) em cada ponto.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se dizer que os resultados obtidos nas imagens reiteram as análises realizadas a partir dos *data loggers* distribuídos na área de estudo, já que também constatou-se temperatura mais elevada na área urbana, principalmente naquelas onde a vegetação não predominou. Em relação às diferenças entre os dados de campo e das imagens, pode-se verificar que em áreas mais homogêneas, caso das áreas rurais, as diferenças foram menores em relação aos dados do urbano. Cenário semelhante foi constatado por Norman e Becker (1995) os quais relatam que a temperatura obtida através de imagens é altamente correlacionada a temperatura do ar, podendo ser consideradas iguais em áreas homogêneas. No estudo de Mutibwa et al. (2015), os autores encontraram relações mais fortes entre temperatura do ar e temperatura de superfície (MODIS) para as estações do verão e outono, e relações mais fracas para o inverno e primavera. A pesquisa revelou que para a maioria das observações a diferença entre as duas temperaturas ficou próxima a 10°C para o horário da imagem.

CONCLUSÕES

A caracterização da temperatura em Santa Maria permitiu verificar a variação térmica do espaço urbano e seu entorno rural a partir da metodologia de implantação de pontos fixos de coletas de dados em campo em diferentes áreas e dados de imagens termais. Com a integração de dados de campo e

orbitais, constatou-se nas áreas urbanas o predomínio de temperaturas superiores ao ambiente rural, embora, em alguns pontos situados em área rural também tenham ocorrido valores elevados de temperatura, sendo justificado pela presença de solo exposto. As maiores diferenças entre a temperatura do urbano e rural ocorreram nas estações da primavera e verão, principalmente nos períodos da noite e madrugada.

A implantação dos pontos fixos em áreas com diferentes características ambientais permitiu reiterar a importância da presença da vegetação para amenizar as temperaturas elevadas. Nos pontos urbanos com menor presença de vegetação (T1 e T6) foram registradas as temperaturas mais elevadas, sendo áreas caracterizadas pelo predomínio de materiais construídos. Em contrapartida, nos pontos urbanos com vegetação (T5) os valores de temperatura foram menores. Nos pontos rurais, destacou-se o T3 com as menores temperaturas em decorrência da sua localização em maior altitude e com densa arborização. A questão da altitude conferiu uma outra característica térmica de T3, pois apresentou temperatura superior aos demais pontos na estação do inverno no período da manhã quando os pontos em menor altitude estavam sob o efeito de neblina.

A partir da comparação entre a temperatura de campo (T_{ar}) e temperatura da imagem (T_S) constatou-se que nas áreas urbanas a temperatura de superfície foi superior a temperatura do ar, em contrapartida, nas áreas rurais as diferenças entre os dois dados são mínimas. O desenvolvimento da presente pesquisa também permitiu constatar a possibilidade de construir abrigos de baixo custo e adaptáveis a diferentes tipos de sensores para estudos da temperatura do ar e quando não for possível a aquisição desses equipamentos, as imagens termais são alternativas gratuitas e eficientes, já que com a análise das mesmas também é possível identificar áreas com temperaturas mais elevadas e que necessitam de mais atenção em relação ao conforto térmico da população.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado da primeira autora.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B. **Cobertura vegetal e qualidade ambiental na paisagem urbana de Santa Maria (RS)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.
- AMORIM, D. M.; COSTA, D. S.; CARVALHO, P. G. S.de; GARRIDO, M. S.; GONÇALVES, I. C. M. Comparação de dados obtidos a partir de sensores de temperatura e umidade relativa do ar protegidos em um abrigo meteorológico de PVC. **Revista Energia na Agricultura**, v. 30, n. 2, p. 119 – 124, 2015.
- BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V; RIGHI, E. Z.; BRESSAN, V. C. Conforto térmico para os seres humanos nas condições de ambiente natural em Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Rural**, v. 45, n. 2, p. 223-230, 2015.
- COLLISCHONN, E. Adentrando a cidade de Pelotas/RS para tomar-lhe a temperatura. **Revista do Departamento de Geografia USP**, v. Especial, p. 9-23, 2016.
- GAGO, E. J.; ROLDAN, J.; PACHECO-TORRES, R.; ORDÓÑEZ, J. The city and urban heat islands: a review of strategies to mitigate adverse effects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 25, p. 749 – 758, 2013.
- GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 148p.
- GERACE, A. & MONTANARO, M. Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8. **Remote Sensing of Environmental**, v. 191, p. 246 – 257, 2017.
- GOBO, J. P. A.; FARIA, M. R.; GALVANI, E. GONÇALVES, F. L.T.; MONTEIRO, L. M. Empirical model of human thermal comfort in subtropical climates: a first approach to the Brazilian Subtropical Index (BSI). **Atmosphere**, n. 9, p. 1-16, 2018.
- GUAN, K. K. Surface and ambient air temperatures associated with different ground material: a case study at the University of California, Berkeley. **Surface and air temperatures of Ground Material**, p. 1 – 14, 2011.
- HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência&Ambiente**, n. 38, p.43-59, 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Santa Maria -RS**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/santa-maria/panorama>> Acesso: 20 janeiro 2018.
- LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13 – 19, 2014.
- MARCHIORI, J. N. A vegetação em Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, n. 38, p.93-112, 2009.

- MONTANARO, M., GERACE, A., ROHRBACH, S. Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 thermal infrared sensor. **Appl. Opt.** v. 54 (13), p. 3963–3978, 2015.
- MONTANARO, M., BARSÌ, J., LUNSFORD, A., ROHRBACH, S., MARKHAM, B. Performance of the Thermal Infrared Sensor on-board Landsat 8 over the first year on-orbit. **Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems XIX.** 9218-17, 2014.
- MUTIIBWA, D.; STRACHAN, S. ALBRIGHT, T. Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, p. 1939 – 1404, 2015.
- NDOSSÌ, M. I. & AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.
- NORMAN, J. M. & BECKER, F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 77, n. 3-4, p. 153 – 166, 1995.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen & Co, 1978.
- RADHI, H.; KIKRY, F.; SHARPLES, S. Impacts of urbanisation on the thermal behaviour of new built up environments: A scoping study of the urban heat island in Bahrain. **Landscape and urban planning**, v. 113, p. 47 -61, 2013.
- REUTER, D., RICHARDSON, C., PELLERANO, F., IRONS, J., ALLEN, R., ANDERSON, M., JHABVALA, M., LUNSFORD, A., MONTANARO, M., SMITH, R., TESFAYE, Z., THOME, K. The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: design overview and pre-launch characterization. **Remote Sens.** 7 (1), p. 1135–1153, 2015.
- ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 2001.
- SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v 103, p. 682 – 703, 2014.
- SARTORI, M.G.B. **O Vento Norte**. Santa Maria: Gráfica e Editora Palloti, 2016.
- STEENEVELD, G. J.; KOOPMANS, B. G.; THEEUWES, N. E. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. **Landscape and Urban Planning**, v. 121, p. 92 – 96, 2014.
- STREUTKER, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.13, p.2.595-2.608, 2002.
- TRINDADE, P. M. T.; SALDANHA, D. L.; PEREIRA FILHO, W. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.69, n. 4, p. 837-855, 2017.
- YU, X.; GUO, X.; WU, Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS – comparison between Radiative Transfer Equation – based method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. **Remote Sensing**, 6, p. 9829 – 9852, 2014.

YUAN, F. & BAUER, M. E. Comparison of impervious surface area and normalized difference Vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, xx, p. 1 – 12, 2006.

VALOR, E. & CASELES, V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South Americas areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 167 – 184, 1996.

VAN de GRIEND, A. A. & OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119 – 1131, 1993.

WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO n°8, 2008.

ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C ++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1796 – 1805, 2006.

**CAPÍTULO IV. ILHAS DE CALOR E COMPARTIMENTAÇÃO FISIAGRÁFICA
DE SANTA MARIA – RS COM AUXÍLIO DE SENSORES REMOTOS**



Ilhas de calor e compartimentação fisiográfica de Santa Maria – RS com auxílio de sensores remotos

Heat islands and physiographic compartmentalization of Santa Maria – RS
with the assistance of remote sensors

*Patricia Michele Pereira Trindade*¹

*Dejanira Luderitz Saldanha*¹

*Waterloo Pereira Filho*²

Recebido em XXXX de XXXX.

Aprovado em XXXX de XXXX.

RESUMO

A expansão das cidades é crescente e implica em problemas no clima urbano. Assim, é importante investigar a variação da temperatura no meio urbano juntamente às suas características ambientais. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a temperatura e ilhas de calor para diferentes classes de compartimentação fisiográfica de Santa Maria – RS. Para a análise foram utilizadas imagens Landsat 8, Sentinel 2-A e modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A compartimentação fisiográfica foi realizada com base na hipsometria e grau de ocupação verde da cidade. Como resultado, verificou-se que a temperatura média das nove classes de compartimentação fisiográfica foi mais elevada conforme o aumento do número das classes, ou seja, a classe 1 (grau de ocupação verde 3 e hipsometria de 150 a 200 metros) apresentou temperatura média inferior à classe 9 (grau de ocupação verde 1 e hipsometria de 60 a 100 metros) para todas as datas estudadas. Ainda, constatou-se que 28% dos locais em área construída apresentaram ilhas de calor superiores a 3°C, localizadas em áreas de grau de ocupação verde 1 (áreas com densa urbanização) ou 2 (área residencial com pouca arborização) e hipsometria de 60 a 200 metros. A análise integrada das características térmicas, relevo e vegetação possibilitou identificação de locais que merecem mais atenção por parte dos gestores públicos quanto às ilhas de calor e carência de áreas verdes.

PALAVRAS-CHAVE: Temperatura de superfície. Relevo. Índice de vegetação.

ABSTRACT

The expansion of cities is crescent and entails problems in the urban climate. Therefore it is important to investigate the temperature variation in the urban environment in association with its environmental characteristics. Thus the object of this research was the assessment of temperature and heat islands for different classes of physiographic

¹Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – UFRGS, RS, Brasil

E-mail: patriciatrindade.sr@gmail.com; dejanira.saldanha@ufrgs.br

²Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFSM, RS, Brasil. E-mail: waterloopf@gmail.com

compartmentalization of Santa Maria – RS, Brazil. For the analysis, Landsat 8 and Sentinel 2-A images were used, along with the digital elevation model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The physiographic compartmentalization was performed based on the hypsometry and the degree of urban green area. As a result, it was verified that the average temperature of the nine classes of physiographic compartmentalization was higher the greater the number of the class, that is, class 1 (degree of green area 3 and hypsometry between 150 and 200 meters) showed an average temperature inferior to that of class 9 (degree of green area 1 and hypsometry between 60 and 100 meters) for all the studied data. Furthermore, the study showed that 28% of the sites in constructed areas presented heat islands superior to 3°C, localized in areas with a degree of green area 1 (areas with high urban density) or 2 (residential areas with few trees) and hypsometry between 60 and 200 meters. The integrated analysis of the thermal characteristics, terrain, and vegetation enabled the identification of sites that merit more attention from public officials in regard to heat islands and lack of green areas.

KEYWORDS: Surface temperature. Terrain. Vegetation index.

* * *

Introdução

De acordo com Oke (1973) e Gartland (2010) ao substituir as superfícies naturais por áreas edificadas (sem planejamento) a atmosfera local é modificada, contribuindo para a formação de ilhas de calor urbanas e acúmulo de poluição no ar, principalmente, nas áreas centrais. Conforme Kruger et al. (2013), Chen et al. (2014) e van Hove et al. (2015) as ilhas de calor ocasionam o desconforto térmico da população, levando a problemas de saúde e no desempenho das atividades rotineiras.

Desta forma, destaca-se a relevância dos estudos e planos que visem caracterizar o comportamento térmico das cidades, apontando áreas que merecem mais atenção quanto ao conforto térmico urbano. Somadas a isto, as características do relevo e vegetação do meio urbano também são discussões necessárias. Conforme Gartland (2010), para aprimorar a base de coleta destas informações, o sensoriamento remoto é uma alternativa proeminente capaz de proporcionar aquisição e análise de dados espaço-temporais de temperatura, vegetação e relevo.

Os produtos dos satélites Landsat 8 com resolução espacial de 30 metros e do Sentinel 2 com 10 metros de resolução espacial são alternativas

viáveis dada a proposta dessa pesquisa e são distribuídas gratuitamente (USGS – Landsat 8; ESA – Sentinel 2). Li e Roy (2017) destacam que a combinação de diferentes dados de satélites proporciona maiores oportunidades para observações frequentes da superfície terrestre sem nuvens. Ao comparar os dados de imagens Landsat 8 e Sentinel 2, Flood (2017) verificou significativa concordância entre as bandas desses satélites. Diversas pesquisas como, Costa, Silva e Peres (2010), Trindade, Saldanha e Pereira Filho (2017), Buyantuyev e Wu (2010) e Deng e Wu (2013), abordaram o uso de imagens termais para análise da temperatura e ilhas de calor urbanas, destacando a importância da aplicação de produtos de sensoriamento remoto no estudo da cidade.

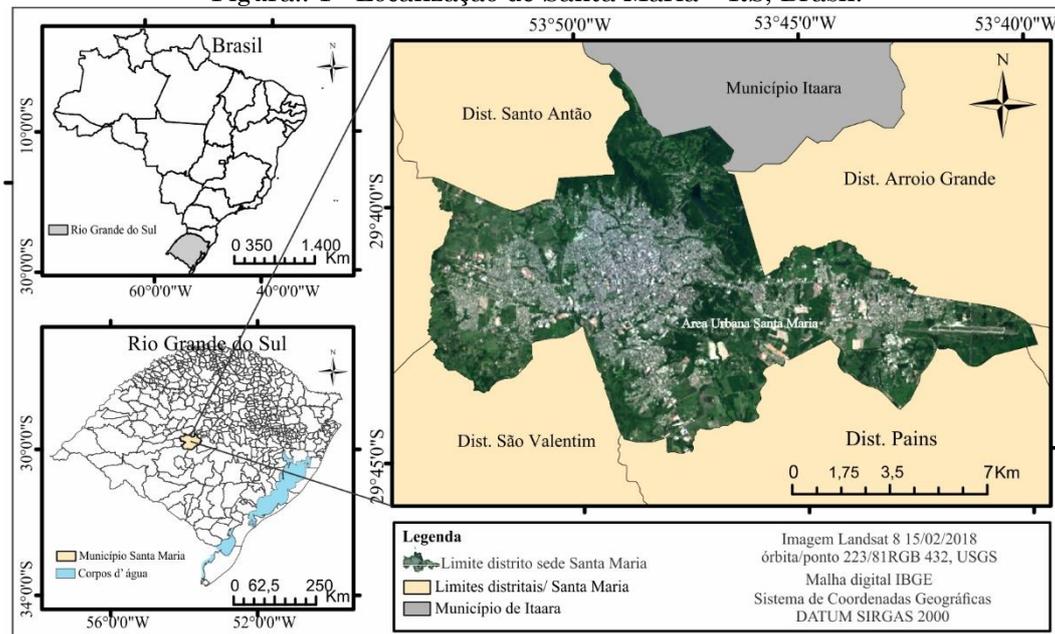
Informações sobre o relevo, como altimetria e orientação de vertentes, que segundo Monteiro (1990) e Fialho (2012), influenciam na variação da temperatura, podem ser adquiridas a partir de modelos digitais de elevação (MDE), como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Estudos em área urbana foram desenvolvidos por Alves e Rocha (2015), Akbari, Samah e Othman (2010) e Elkhrachy (2017) a partir de dados SRTM.

A análise das variáveis do clima das cidades deve ser acompanhada pela interpretação das características ambientais da área de estudo como, hipsometria e vegetação. Neste sentido, o objetivo do presente estudo foi avaliar a temperatura e ilhas de calor para diferentes classes de compartimentação fisiográfica da área urbana de Santa Maria – RS.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no centro do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1) situada na zona de transição geomorfológica entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Periférica do Rio Grande do Sul. Santa Maria é uma cidade de porte médio com população estimada em 2018 em aproximadamente 280 mil habitantes (IBGE, 2018).

Figura.. 1 - Localização de Santa Maria – RS, Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme Pires e Dal' Asta (2011) a área urbana de Santa Maria apresenta compartimentação geomorfológica em três unidades distintas. A primeira unidade (Unidade I) é caracterizada pelos morros (Rebordo do Planalto) e morrotes (morros testemunhos Cerrito e Mariano da Rocha) com declividade de até 30%. A Unidade II corresponde às colinas representadas por áreas de ondulações suaves dentro do tecido urbano. Já a Unidade III descreve regiões de planícies e terraços fluviais, o que representa as áreas de deposição de sedimentos dos canais fluviais presentes na cidade.

De acordo com Marchiori (2009), a vegetação de Santa Maria compreende duas unidades, a saber: florestas e campos. As áreas de florestas estão localizadas na encosta do Planalto, nos morros testemunhos e nas margens de canais fluviais, derivada da Floresta Estacional Decidual. A segunda unidade vegetal refere-se aos campos nativos que encontram-se na Depressão Central.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais utilizados

- a) Imagens do satélite Landsat 8: bandas do visível e infravermelho próximo em refletância de superfície (bandas 2, 3, 4, e 5) do sensor *Operational Land Imager* (OLI) e banda termal em temperatura de brilho (banda 10) do sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) correspondentes às seguintes datas: 01/04/2017, 06/07/2017, 07/08/2017, 11/11/2017, 13/12/2017 e 15/2/2018 – com 30 metros de resolução espacial;
- b) Imagens do satélite Sentinel – 2 A: bandas do visível e infravermelho próximo (2, 3, 4, e 5) em refletância no topo da atmosfera do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) referentes às datas de 11/04/2017, 20/07/2017, 24/11/2017 e 15/02/2018 – 10 metros de resolução espacial;
- c) Modelo digital de elevação (MDE) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 30 metros de resolução espacial.

2.2 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos desta pesquisa seguiram 4 etapas: Processamento das imagens Landsat 8; Processamento das imagens Sentinel 2-A; Processos com SRTM; Compartimentação fisiográfica.

2.2.1 Processamento das imagens Landsat 8

Para esta etapa foram utilizadas as imagens Landsat 8 adquiridas de acordo com a data e nível de processamento na plataforma *Earth Explorer* (<https://lpcsexplorer.cr.usgs.gov/>). Neste caso, foram selecionadas as bandas em refletância de superfície (visível e infravermelho próximo) e em temperatura de

brilho (banda termal 10). Assim, foram seguidos três passos: o primeiro correspondeu à interpretação e cálculo do índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI); o segundo passo foi o cálculo da temperatura de superfície (TS) a partir das bandas termais; e o terceiro foi o fatiamento das imagens em diferentes classes de temperatura e ilhas de calor urbanas.

Para a interpretação de imagens, no primeiro passo, analisou-se a distribuição dos padrões de cobertura da terra presentes na área de estudo a partir de composições coloridas com as bandas do visível e infravermelho próximo. Para tal objetivo, também foram utilizadas as imagens de NDVI geradas (Equação 1) para todas as datas o que contribuiu para a identificação das áreas vegetadas na cidade. Na literatura é comum a utilização do NDVI em pesquisas que abordam monitoramento da vegetação, culturas agrícolas, áreas florestais, como também em assuntos climáticos (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{ivp}} - \rho_{\text{v}}) / (\rho_{\text{ivp}} + \rho_{\text{v}}) \quad (1)$$

Onde, ρ_{ivp} = reflectância no infravermelho próximo (banda 5) e ρ_{v} = reflectância no vermelho (banda 4).

No segundo passo, as imagens de temperatura de superfície foram calculadas a partir do *plugin Land Surface Temperature* (LST) disponível no *software* QGIS. Conforme determinação desta ferramenta importou-se a banda 10 em temperatura de brilho para cada data e aplicou-se o método “*Planck Equation*”. De acordo com Ndossi e Advan (2016), este método calcula a TS a partir da correção da emissividade dos alvos presentes na cena. Ressalta-se que a emissividade também foi calculada no LST com a ferramenta *Surface Emissivity* considerando valores de NDVI, conforme a metodologia proposta por Zhang et al. (2006).

As imagens de saída foram submetidas à ferramenta “*Raster Color Slices*” do Envi, resultando em 9 classes de temperatura com intervalo de 3°C (14°C a >38°C). Como resultado final obteve-se mapas de temperatura de

superfície em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). Já para a geração das imagens de ilhas de calor realizou-se a subtração dos valores médios de temperatura rural de cada imagem e submeteu-as ao fatiamento de 11 classes compreendendo o intervalo de $<-3^{\circ}\text{C}$ a $>6^{\circ}\text{C}$. Como resultado final obteve-se mapas de ilhas de calor urbana de Santa Maria.

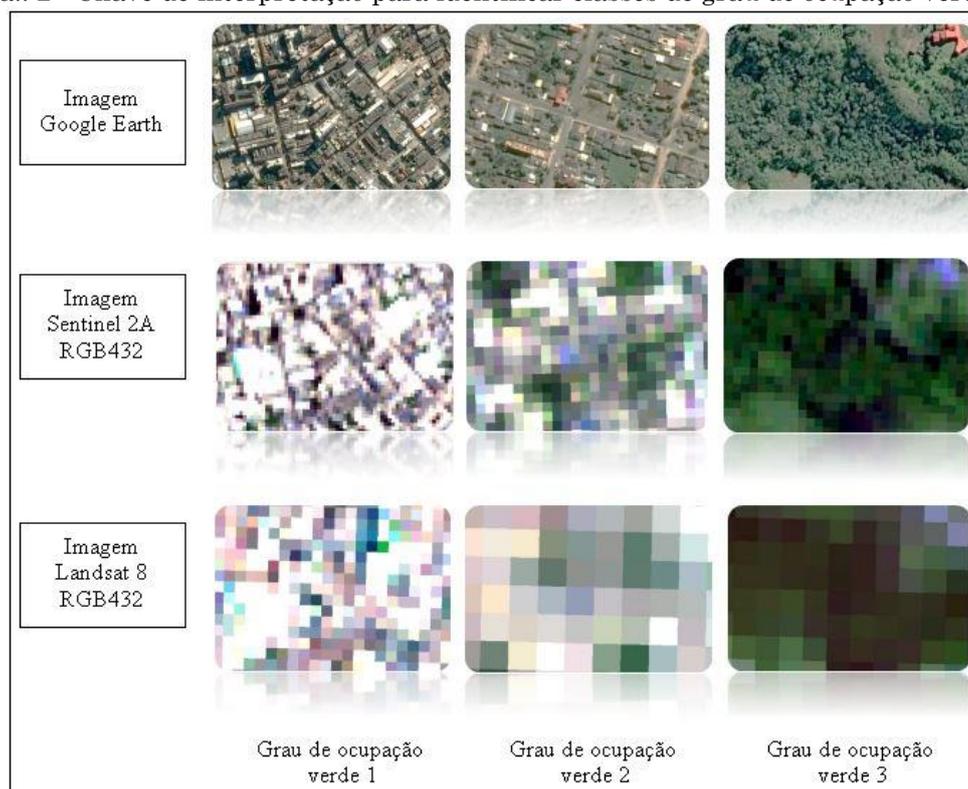
2.2.2 Processamento das imagens Sentinel 2-A

As imagens do satélite Sentinel foram adquiridas no site da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* – ESA) em nível de processamento 1-C, correspondentes a valores de refletância no topo da atmosfera. Para estes produtos foi necessária a realização da correção das imagens para refletância de superfície (ANTUNES et al., 2012 e LATORRE et al., 2002). Para tal efeito, utilizou-se a ferramenta Sen2cor do programa SNAP desenvolvido pela ESA para processamento das imagens Sentinel. Como resultado obteve-se imagens no nível – 2A em refletância de superfície.

Posteriormente, as imagens foram utilizadas para o cálculo do NDVI partir da equação 1. Entende-se que as imagens Sentinel permitiram a identificação mais eficiente da vegetação dentro da área urbana devido sua melhor resolução espacial. Este fato revelou pequena variação do NDVI entre as diferentes datas, o que levou a geração de uma imagem de NDVI médio para o período de estudo, a partir das quatro imagens de NDVI geradas. Assim, esta etapa resultou na identificação de três diferentes classes de NDVI (-0,2505 a 0,2465, 0,2465 a 0,4995 e valores superiores a 0,4995). Neste caso, cada classe foi associada a um grau de ocupação verde (GV). O grau 1 (valores de -0,2505 a 0,2565) corresponde às áreas com a ausência de vegetação e densamente edificadas, o grau 2 (0,2565 a 0,4995) caracteriza-se em áreas residenciais com pouca vegetação, e o grau 3 (valores superiores a 0,4995) áreas com densa vegetação. É importante destacar que estas classes foram identificadas dentro do limite de áreas construídas da cidade a partir da vetorização do contorno das áreas edificadas com as imagens Sentinel.

Neste sentido, a classificação supracitada foi validada a partir de observações realizadas em imagem de alta resolução (*Google Earth*). Este processo consistiu na distribuição de 155 pontos, de forma sistemática, sobre o limite das áreas construídas. A distribuição e quantidade de pontos foram definidas de acordo com as observações definidas por Banko et al. (1998), o qual destaca que deve ser considerado no mínimo 50 pontos por classe e a forma sistemática garante que os pontos amostrais de cada classe estejam distribuídos em toda área considerada. Desta forma, cada ponto foi verificado e determinado a classe de grau ocupação verde que pertencia conforme os critérios estabelecidos quanto a característica da superfície (Figura 2).

Figura.. 2 - Chave de interpretação para identificar classes de grau de ocupação verde (GV).



Fonte: Elaborado pelos autores.

A concordância entre a imagem classificada e os pontos observados foi realizada a partir da matriz de confusão e cálculo do índice *Kappa*. Neste sentido, considerou-se os limiares de referência apresentados por Landis e Koch (1977), conforme a tabela 1.

Tabela CIV 1 - Concordância da classificação com índice Kappa.

Valor <i>Kappa</i>	Concordância
< 0	Péssima
0 a 0,2	Ruim
0,2 a 0,4	Razoável
0,4 a 0,6	Boa
0,6 a 0,8	Muito Boa
0,8 a 1	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

2.2.3 Processos com SRTM

O modelo digital de elevação SRTM disponível na plataforma *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) permitiu verificar algumas características importantes do relevo da área de estudo quanto à altimetria. Tais informações serviram de apoio para o entendimento da distribuição da temperatura na área de estudo, já que conforme Geiger (1990) e Monteiro (1990) as características altimétricas podem influenciar na variação do regime térmico urbano. Para atingir tal objetivo, foi elaborada a classificação da hipsometria no *software* ArcGis.

A elaboração do mapa hipsométrico visou identificar e representar as variações da superfície quanto às classes altimétricas, seguindo um sistema de graduação de cores sugerido por Loch (2006). Assim, as menores altitudes foram representadas por tons de verde, e conforme os valores aumentavam, as cores variavam gradualmente para os tons de amarelo, laranja, vermelho e marrom. Para Martinelli (2003) e Loch (2006) não existe uma convecção definida para o número de classes, pois o que importa é localizar os pontos representativos do terreno e assim determinar as classes de melhor representação. Desse modo, obteve-se como resultado um mapa hipsométrico com 7 classes representativas do terreno para a cidade de Santa Maria.

2.2.4 Compartimentação fisiográfica

A compartimentação fisiográfica foi realizada a partir do cruzamento das classes de hipsometria e grau de ocupação verde, sendo estas características consideradas como as principais condicionantes à variação da temperatura na cidade. A partir da ferramenta de geoprocessamento “*Intersect*” do *software* ArcGIS foram estabelecidas 9 classes de compartimentação (Tabela 2). Posteriormente, com a mesma ferramenta também foram cruzadas as classes de compartimentação fisiográfica e as classes de ilhas de calor, resultando na identificação de 5 classes de ilhas de calor superiores a 3°C com base no grau de ocupação verde e hipsometria (Tabela 2).

Tabela CIV 2 - Classes de compartimentação fisiográfica (grau de ocupação verde - GV e hipsometria - HP) e classes de identificação de ilhas de calor >3°C com base no grau de ocupação verde e hipsometria em Santa Maria – RS.

Classes Compart.	GV	HP (m)	Classes Ilhas calor	Ilha calor	GV	HP (m)
1	3	150 - 200	1	>3°C	1	100 - 150
2	3	100 - 150	2	>3°C	2	100 - 150
3	3	60 - 100	3	>3°C	1	150 - 200
4	2	150 - 200	4	>3°C	1	60 - 100
5	2	100 - 150	5	>3°C	2	60 - 100
6	2	60 - 100				
7	1	150 - 200				
8	1	100 - 150				
9	1	60 - 100				

Fonte: Elaborado pelos autores.

3 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da integração e avaliação das características do relevo, vegetação e temperatura da área de estudo. Desta forma, são apresentados em 3 etapas: Caracterização da área urbana quanto à temperatura e ilhas de calor; Características do relevo e vegetação e relações com a temperatura; e Compartimentação fisiográfica com base no grau de ocupação verde e hipsometria.

3.1 Caracterização da área urbana quanto à temperatura e ilhas de calor

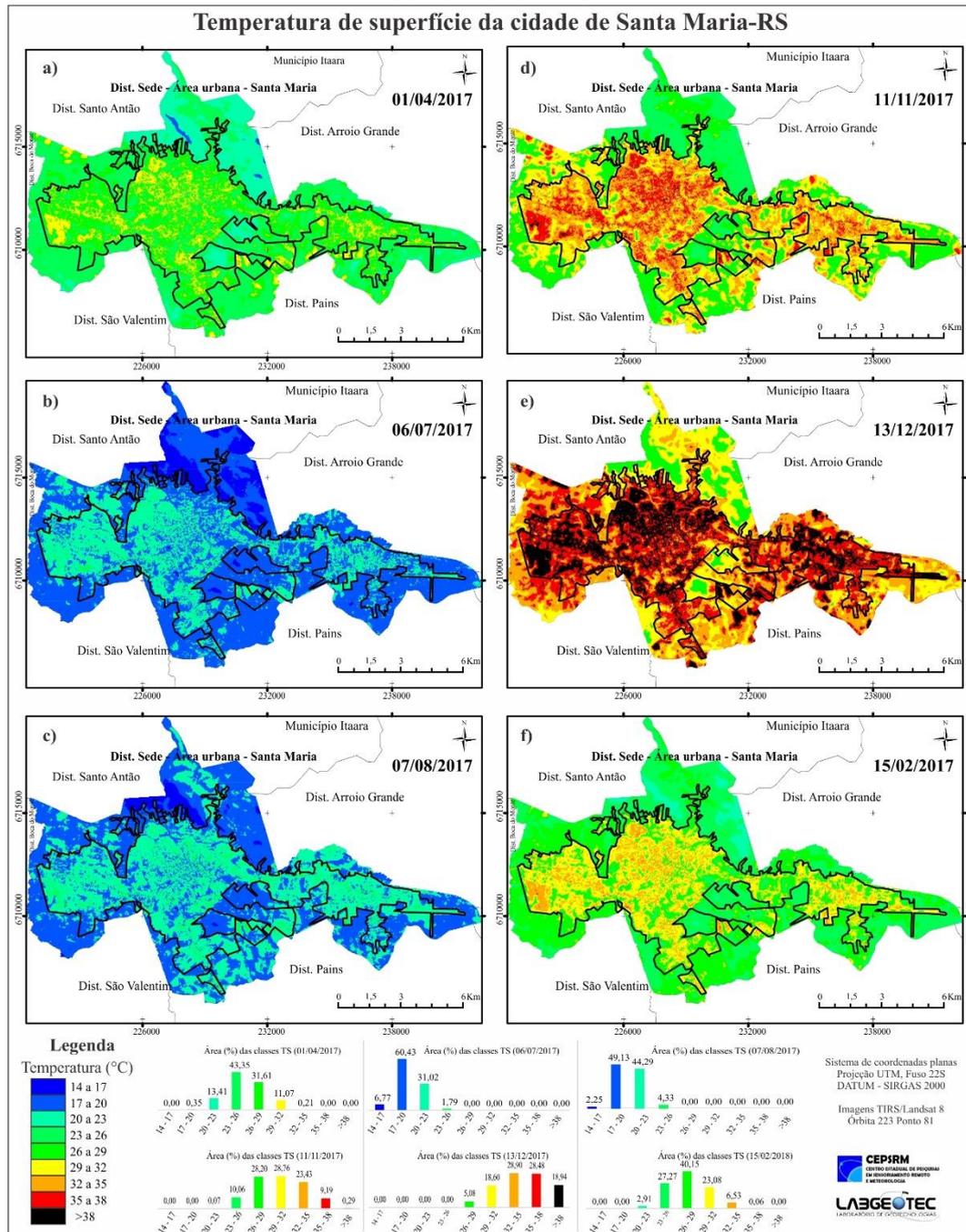
A temperatura de superfície para o mês de abril variou de 17°C a 32°C (Figura 3 – a) e as temperaturas mais elevadas foram identificadas nas áreas construídas (29°C a 32°C). As classes de 23°C a 26°C e 26°C e 29°C ocorreram em, aproximadamente, 75% da cidade, já o intervalo de 20°C a 23°C foi observado nas áreas localizadas na região norte e sudoeste, representando 13% da área total da cidade.

Na imagem do mês de julho, verificou-se que a temperatura variou de 14°C a 26°C (Figura 3 – b) e novamente as temperaturas mais elevadas foram identificadas nas áreas construídas, representando 33% da área total para o intervalo de 20°C a 26°C. No entanto, o intervalo de temperatura que mais ocorreu foi o de 17°C a 20°C (60%). Para a imagem do mês de agosto a temperatura também variou de 14°C a 26°C (Figura 3 – c) e verificou-se um aumento da ocorrência da classe de 20°C a 23°C e diminuição da classe de 17°C a 20°C.

A temperatura de superfície para o mês de novembro apresentou valores mais elevados, variando de 23°C a 38°C (Figura 3 – d). Dentro do limite das áreas construídas verificou-se o predomínio das classes de 32°C a 35°C e 35°C a 38°C, totalizando 52% da área total da cidade. A classe de 29°C a 32°C ocorreu em 28% da área total, apresentando-se em áreas fora do limite construído nas regiões com o predomínio de solo exposto, característico da estação).

Na imagem de dezembro foram identificadas as temperaturas mais elevadas de todas as imagens analisadas, registrando um intervalo de 26°C a >38°C (Figura 3 – e). Em contrapartida, na imagem de fevereiro as temperaturas foram mais amenas com predomínio da classe de 29°C a 32°C (Figura 3 –f). Em estudo realizado por Costa et al. (2010), os autores verificaram que para imagem termal de dezembro da área urbana de Ilha Solteira –SP, os valores de temperatura nas áreas vegetadas variaram de 21°C a 23°C, já nas áreas edificadas os valores variaram de 41°C a 44°C.

Figura.. 3 - Imagens de temperatura de superfície (TS) para as estações na área urbana de Santa Maria – RS.

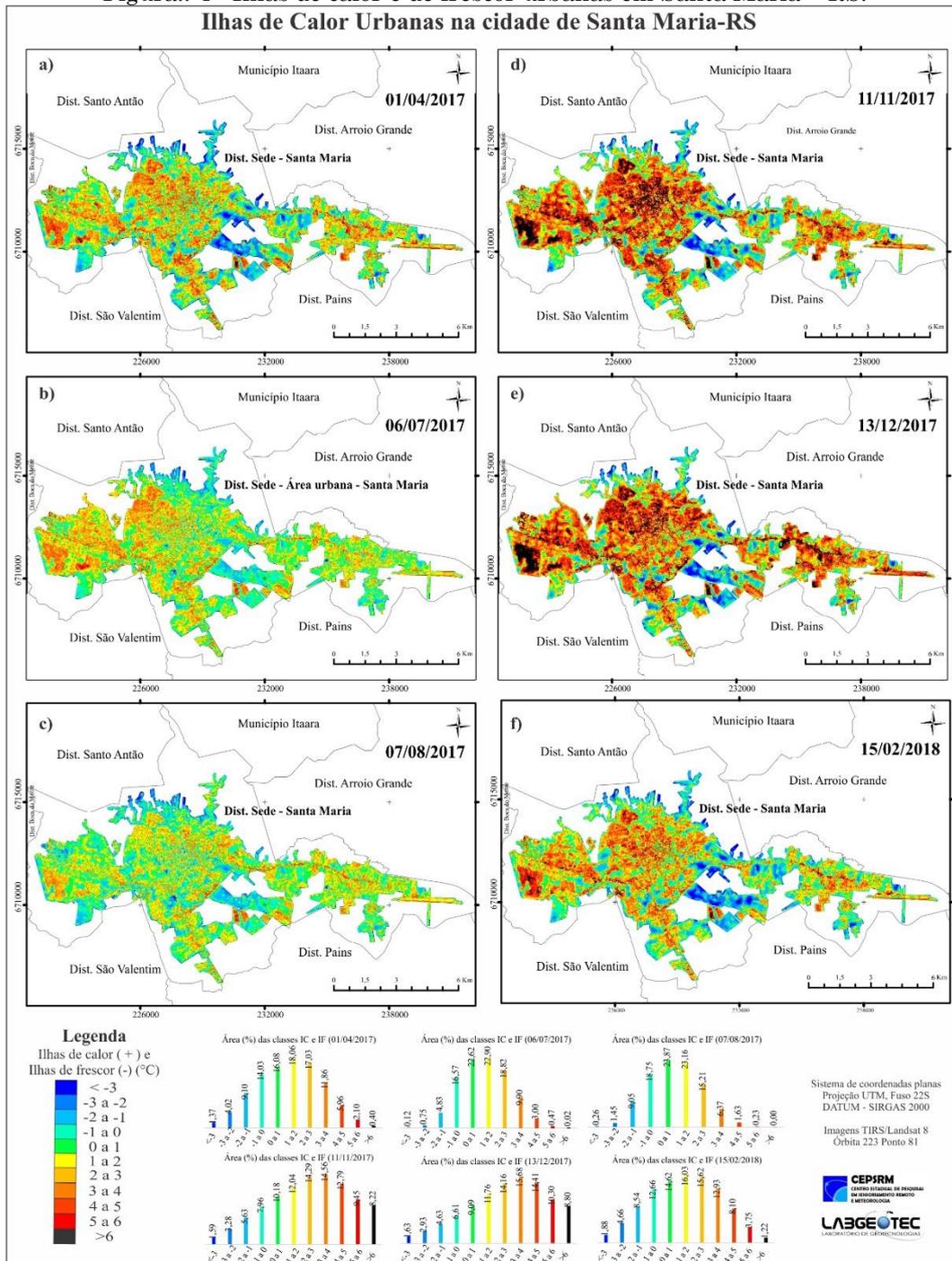


Fonte: Elaborado pelos autores.

Um dos principais objetivos na análise da temperatura nas cidades é identificar regiões com valores mais elevados, apontando áreas críticas quanto ao conforto térmico urbano. Seguindo esta abordagem, foi possível apontar as áreas com ilhas de calor de 1°C a >6°C (Figura 4), bem como ilhas de frescor

com temperaturas inferiores em até 3°C, identificando ilhas de calor de fraca a forte magnitude e ilhas de frescor de média magnitude (GARCÍA, 1996).

Figura.. 4 - Ilhas de calor e de frescor urbanas em Santa Maria – RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos meses de abril (Figura 4 – a) e junho (Figura 4 – b), as ilhas de calor que apresentaram maior participação ficaram no intervalo de 1°C a 3°C (51% da área em abril e 62% em junho). Para o mês de agosto, as ilhas de calor que predominaram foram de 0°C a 1°C (23%) e 1°C a 2°C (23%), apresentando-se como a data em que as ilhas de calor foram mais amenas. No estudo das ilhas de calor de Tóquio, Hung et al. (2006) verificaram ilhas de calor com valores mínimo de 3°C e máximo de 5°C para os meses inverno.

Para as imagens dos meses quentes (novembro, dezembro e fevereiro) verificou-se um cenário de ilhas de calor mais intensas, com aumento da participação das classes de 5°C a 6°C e >6°C. Na imagem de novembro, constatou-se que o intervalo de maior ocorrência foi de 2°C a 4°C em 28% (Figura 4 – d). Características semelhantes foram verificadas na imagem de dezembro, onde o intervalo de maior ocorrência foi de 2°C a 5°C, em aproximadamente 44% da área (Figura 4 – e). As ilhas de calor na imagem de fevereiro as classes de maior ocorrência foram as de 1°C a 2°C (16%) e 2° a 3°C (15%) (Figura 4 – f). Em trabalho anterior, Trindade, Saldanha e Pereira Filho também identificaram ilhas de calor mais intensas nas estações de primavera e verão para uma análise temporal de 20 anos.

De modo geral, pode-se concluir que para os meses frios as ilhas de calor apresentaram-se mais amenas com maior ocorrência dos intervalos de 1°C a 3°C. Já nos meses quentes verificou-se ilhas de calor mais elevadas, com predomínio do intervalo de 2°C a 4°C, configurando ilhas de calor de média magnitude (GARCÍA, 1996). Resultados semelhantes foram encontrados por Hung et al. (2006) ao analisarem a variação das ilhas de calor a partir de 28 imagens termais correspondentes ao período de junho de 2001 a maio de 2002. No referido estudo, os autores verificaram ilhas de calor mais intensas para os meses do verão e mais amenas para o inverno em Tóquio.

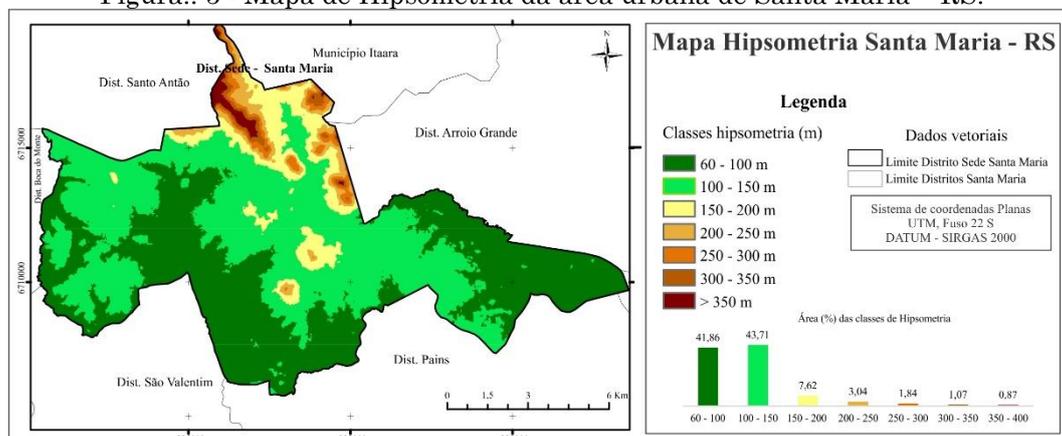
Em todas as datas analisadas foi possível apontar as mesmas áreas com ilhas de calor mais proeminentes, no caso na região oeste, centro, nordeste e sudoeste. Pode-se dizer que os resultados alcançados estão de acordo com os estudos de Voogt e Oke (2003) e Weng et al. (2004) que afirmam

que a consequência ambiental da urbanização é o efeito da ilha de calor urbana, onde as áreas edificadas são mais quentes que áreas com vegetação.

3.2 Características do relevo e vegetação e relações com a temperatura

Ao analisar as características de altimetria da área e estudo verificou-se que as classes de altitude mais elevada (200 a >350 m) representaram, aproximadamente, 6,8% da área da cidade, localizadas na região norte e sudoeste. Uma participação de 7% foi encontrada para a classe de 150 a 200 metros, localizadas nas regiões norte, sudoeste e algumas áreas do centro da cidade. Em contrapartida, as classes 60 a 100 metros e 100 a 150 metros apresentaram maior ocorrência, com 41% e 43%, respectivamente (Figura 5). A amplitude entre as classes de hipsometria se deve ao fato da cidade estar localizada em uma zona de transição geomorfológica, com altitudes mais elevadas ao norte (Planalto Meridional Brasileiro) e menores na Depressão Periférica.

Figura.. 5 - Mapa de Hipsometria da área urbana de Santa Maria – RS.

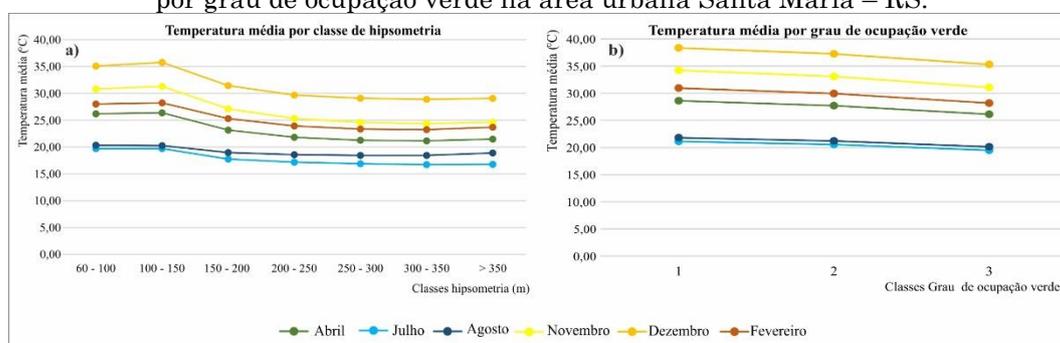


Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores de temperatura foram aproximados nas classes de 60 a 100 metros e 100 a 150 metros e quando analisada a classe de hipsometria de 150 a 200 metros constatou-se a diminuição da temperatura média em até 3°C em abril e fevereiro, 2°C em julho e agosto, e em 4°C em novembro e dezembro (Figura 6 – a). A partir da classe de 200 a 250 metros as temperaturas médias

estabilizaram-se até 350 metros, apresentando valores que variaram de 21°C em abril até 29°C em dezembro. Assim, constatou-se diferenças de 4,81°C entre as áreas de menor e maior altitude. Em trabalho anterior, Nascimento, Souza e Oliveira (2009) ao analisarem a relação da temperatura de superfície e a topografia do município de Minaçu – GO identificaram correlação negativa entre os valores de hipsometria e temperatura, com temperatura mais elevada associada à baixa altitude.

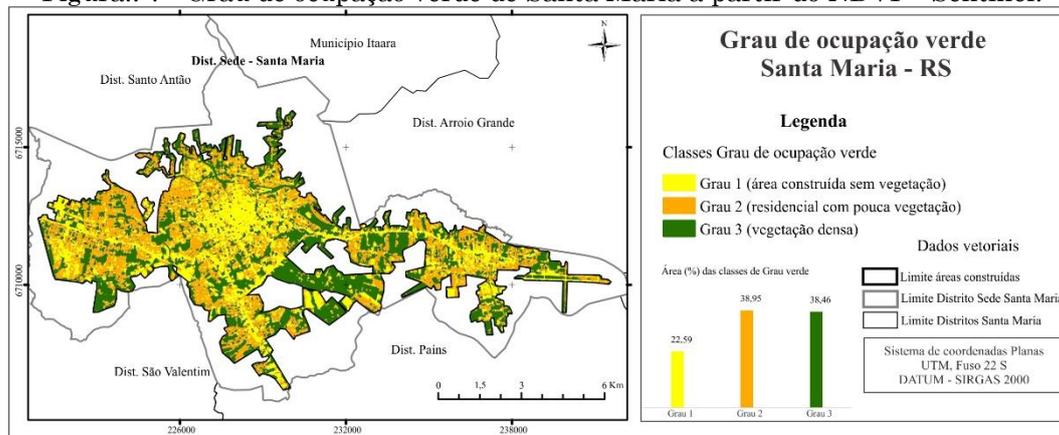
Figura.. 6 - a) Temperatura média para cada classe de hipsometria; b) Temperatura média por grau de ocupação verde na área urbana Santa Maria – RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a análise da vegetação da cidade considerou-se o NDVI gerado a partir de imagens Landsat 8 (resolução 30 metros) e Sentinel 2 (resolução de 10 metros). Diante das análises, foi possível verificar que o NDVI não variou muito ao longo do período analisado, apresentando sempre valores mais elevados nas regiões norte e nos morros testemunhos (sudoeste) e menores valores nas áreas construídas. Em trabalhos anteriores, Mandanici e Bitelli (2016) e Korhonen, Packalen e Rautiainen (2017) ao compararem dados referentes a cinco imagens de NDVI Landsat 8 e Sentinel 2A adquiridas na mesma data também encontraram semelhanças entre os valores do índice. No entanto, por apresentar uma melhor resolução espacial as imagens NDVI/Sentinel 2 possibilitaram a melhor identificação do grau de ocupação verde (Figura 7) dentro do limite das áreas construídas da cidade.

Figura.. 7 - Grau de ocupação verde de Santa Maria a partir do NDVI – Sentinel.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Neste aspecto, o NDVI médio das imagens Sentinel possibilitou a interpretação de três classes de grau de ocupação verde, as quais apresentaram concordância excelente com os pontos observados na imagem de alta resolução, com valor *Kappa* de 0,88. Em relação à distribuição, observou-se que a classe 1 ocupou aproximadamente 22% da área total; as classes 2 e 3 (NDVI > 0,4995) corresponderam a 38% cada uma. Pode-se dizer que os valores mais baixos de NDVI corresponderam estritamente às superfícies construídas e os valores mais elevados (classe 3) às áreas cobertas por grama ou árvores. Este fato também foi observado por Yuan e Bauer (2006) em estudo realizado para sete cidades da área metropolitana de Minnesota.

Quanto a temperatura média por classe de grau de ocupação verde constatou-se que a classe grau 1 apresentou temperatura mais elevada em todas as datas estudadas, já menor temperatura foi verificada na classe grau 3 (Figura 6 – b). Em uma análise geral, foi possível verificar que a temperatura média da classe 1 foi superior em 2,46°C comparado a temperatura da classe 3, já as diferenças médias entre as classes grau de ocupação verde 1 e 2 e 2 e 3 foram de 0,89°C e 1,57°C respectivamente.

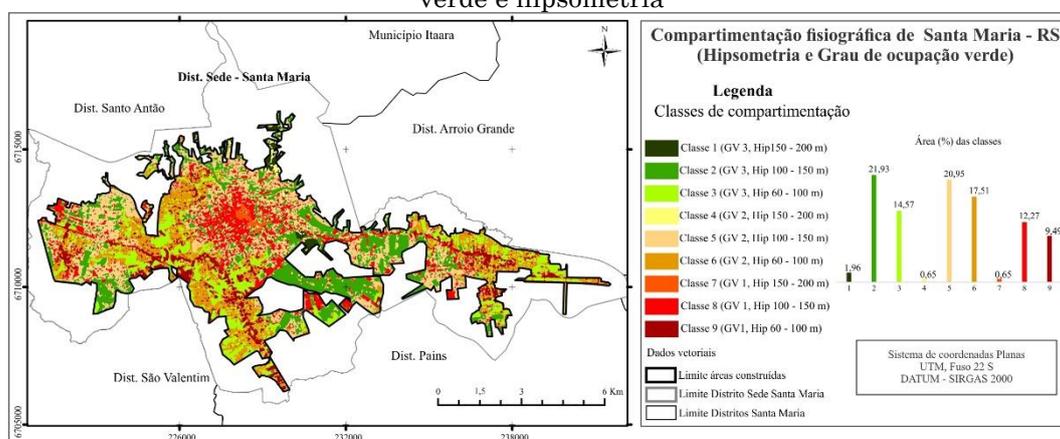
Diante do exposto, cabe destacar a importância de áreas vegetadas para a amenização da temperatura nos espaços urbanos. Na investigação realizada por Buyantuyev e Wu (2010) com imagens termais e NDVI para a capital do Arizona (EUA), os autores verificaram que os valores de NDVI

médio foram a explicação mais significativa para a temperatura durante o dia e constataram que para cada acréscimo de 0,1 de NDVI (ou aproximadamente 10% de cobertura) a temperatura diurna diminuiu 2,8°C no mês de junho.

3.3 Compartimentação fisiográfica com base no grau de ocupação verde e hipsometria

Com base nas análises verificou-se que as características da superfície de grau de ocupação verde e hipsometria foram as que mais influenciaram na temperatura da área de estudo. Assim, realizou-se a compartimentação fisiográfica (limite construído) da cidade em 9 classes com base nas características ambientais supracitadas (Figura 8).

Figura.. 8 - Compartimentação fisiográfica de Santa Maria com base do grau de ocupação verde e hipsometria

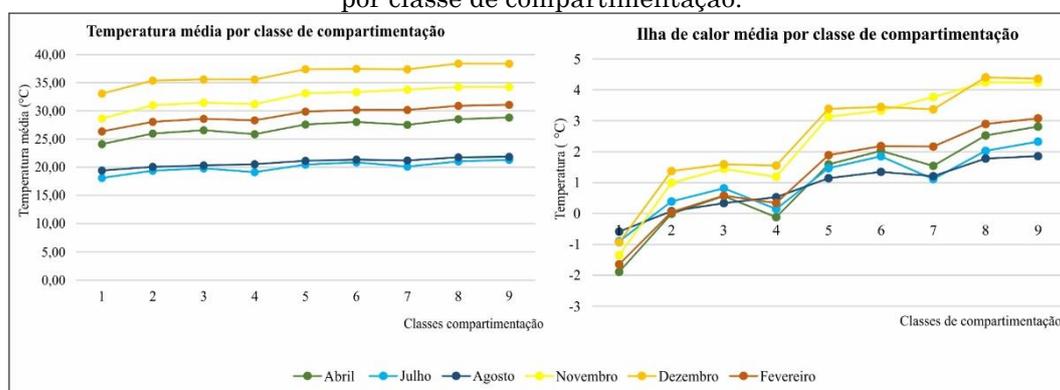


Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto à espacialização, verificou-se que as classes 3, 6 e 9 ocorreram, principalmente, nas regiões oeste, centro-oeste, sul e leste da cidade. Já as classes 5 e 8 nas regiões oeste, centro e algumas áreas do leste, enquanto as classes 1 e 4 estabeleceram-se em áreas da região norte. A classe 2 ocorreu em todas as regiões, já a classe 7 ficou limitada a uma pequena área do centro, localizada nas ruas onde começaram as primeiras habitações da cidade.

Em relação às características térmicas de cada classe, verificou-se que a temperatura média foi mais elevada conforme o aumento do número das classes, ou seja, a classe 1 apresentou temperaturas inferiores às da classe 9 para todas as datas estudadas (Figura 9 - a). O mesmo ocorreu para as ilhas de calor, quando na classe 1 foram identificados valores negativos (ilhas de frescor) e na classe 9 valores superiores a 4°C (Figura 9 - b).

Figura.. 9 - a) Temperatura média por classe de compartimentação; b) ilha de calor média por classe de compartimentação.



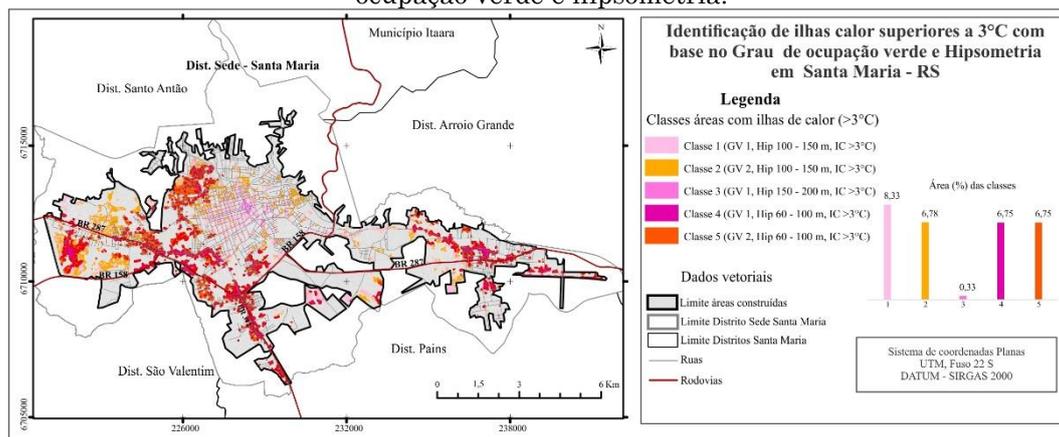
Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir do cruzamento entre as classes de compartimentação fisiográfica e os valores médios das ilhas de calor foram identificadas 5 situações (classes) dentro do limite das áreas construídas (Figura 10), as quais representaram 28% da área. Todas as classes caracterizaram-se por ilhas de calor superiores a 3°C e o que as diferenciou foram as classes de grau de ocupação verde e hipsometria.

Diante desta análise foi possível constatar que as cinco classes distribuíram-se nas regiões oeste e centro da cidade, principalmente em áreas de periferia configurando áreas críticas quanto ao conforto térmico da população local. Conforme Amorim (2015), nos bairros estabelecidos nas periferias são utilizados materiais construtivos de baixa qualidade e inadequados do ponto de vista da eficiência térmica. Além disso, nas áreas identificadas verificou-se que a intensificação da temperatura foi extremamente influenciada por áreas edificadas e ausência de espaços verdes.

Conforme Chiesura (2004) e Tian et al. (2011), os espaços verdes oferecem benefícios ao meio urbano como a purificação do ar e amenização da temperatura.

Figura.. 10 - Identificação de áreas com ilhas de calor superiores a 3°C a partir do grau de ocupação verde e hipsometria.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 Conclusões

A partir dos produtos de sensoriamento remoto foi possível analisar a distribuição da temperatura e ilhas de calor urbanas de Santa Maria conforme sua compartimentação fisiográfica. Com o modelo digital de elevação SRTM constatou-se as principais características da cidade quanto a altimetria. A resolução espacial (10 metros) das imagens Sentinel – 2 permitiu melhor identificar as áreas cobertas por vegetação, contribuindo na verificação de três classes de grau de ocupação verde na cidade. Com a compartimentação fisiográfica verificou-se valores baixos de temperatura nas classes de maior altitude e presença de vegetação, em contrapartida, as áreas de menor altitude e pouca vegetação apresentaram temperatura elevada.

A realização desta pesquisa demonstrou a importância do estudo da cidade juntamente com suas características de superfície como, temperatura, vegetação e relevo. Neste sentido, a análise integrada dessas variáveis possibilitou o melhor entendimento do espaço urbano, bem como a

identificação de locais que requerem mais atenção por parte dos gestores públicos quanto às ilhas de calor e carência de áreas verdes (oeste, centro e nordeste). Neste contexto, cabe destacar a contribuição dos produtos de sensoriamento remoto nas análises realizadas.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado da primeira autora (Processo: 141551/2015-1).

Referências

- AKBARI, A.; SAMAH, A. A.; OTHMAN, F. Practical use of SRTM digital elevation dataset in the urban-watershed modeling. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 10, n. 2, 2010.
- ALVES, W. S.; ROCHA, T. Análise dos aspectos hipsométricos e de exposição do relevo da área urbana de Iporá – GO: uma contribuição para o estudo do clima das cidades. **Revista Ambiência**, v. 12, p. 793 – 801, 2016.
- AMORIM, M. C. C. T. Clima urbano: concepções teóricas, metodologias, aplicações e perspectivas. **Revista Equador**, v. 4, p. 49-66, 2015.
- ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; COSTA, A. R. da; GLERIANI, J. M. Correção Atmosférica de Imagens Alos/Avnir-2 Utilizando o Modelo 6S. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 4, p.531-539, 2012.
- BANKO, G. et al. A review of Assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data and of methods including remote sensing data in forest inventory. **International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg**, 1998.
- BUYANTUYEV, A.; WU, J. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. **Landscape Ecol**, v. 25, p. 17 – 33, 2010.

- CHEN, D.; WANG, X.; THATCHER, M.; BARNETT, G.; KACHENKO, A.; PRINCE, R. Urban Vegetation for reducing heat related mortality. **Environ Pollut**, 192, p.275-284. 2014.
- CHIESURA, A. The role of urban parks for the sustainable city. **Landscape and Urban Planning**, v. 68, n.1, p. 129–138, 2004.
- COSTA, D. F. da.; SILVA, H. R.; PERES, L. de F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira – SP através da utilização de geotecnologias. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.30, n.5, p. 974-985, 2010.
- DENG, C.; WU, C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: a spectral unmixing and thermal mixing approach. **Remote Sensing Environment**, v.131, p. 262-274, 2013.
- ELKNRACHY, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: a case study of Najran city, Saudi Arabia. **Engineering Journal**, p. 1 – 10, 2017.
- FLOOD, N. Comparing Sentinel-2A and Landsat 7 and 8 using surface reflectance over Australia. **Remote Sensing**, 9 (7), p. 2 - 14 , 2017.
- GARCÍA, F. F. Manual de climatologia aplicada: clima, medio ambiente y planificación. Madrid: Editorial Síntesis, S.A., 1996. 285p
- GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 148p.
- GEIGER, R. **Influências das formas do relevo no microclima**. In: _____ Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. p. 382-474, 1990.
- HUNG, T.; UCHIHAMA, D.; OCHI, S.; YASUOKA, Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. **International Journal Earth Observation and Geoinformation**, v. 8, p. 34 – 48, 2006.
- IBGE. **Estatísticas Santa Maria – RS**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/por-cidade-estado-geociencias.html?t=destaques&c=4316907>> Acesso: maio de 2018.
- KORHONEN, L.; PACKALEN, P.; RAUTIAINEN, M. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 195, p. 259 – 274, 2017.

- KRUGER E.; DRACH P.; EMMANUEL R.; CORBELLA O. Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK. **Theor Appl Climatol**, 112(1–2), p. 127-141, 2013.
- LATORRE, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos. **Espaço & Geografia**, v. 5, p. 153–178, 2002.
- LANDIS, J.; KOCH, G. G. The measurements of agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 3, p. 159 – 179, 1977.
- LI, J.; ROY, D. P. A global analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring. **Remote Sensing**, 9, 902, p. 1 – 17, 2017.
- LOCH, R. E. N. **Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.
- MANDANICI, E.; BITELLI, G. Preliminary comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for a combined use. **Remote Sensing**, 8, p. 1 - 10, 2016.
- MARCHIORI, J. N. A vegetação em Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, n. 38, p.93-112, 2009.
- MARTINELLI, M. **Cartografia temática: caderno de mapas**. São Paulo: EDUSP, 2003.
- MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **Geosul**, Florianópolis, n.9, p. 61-79, 1990.
- NASCIMENTO, D. T. F.; SOUZA, S. B.; OLIVEIRA, I. J. de. A relação entre os valores de temperatura superficial terrestre (tst), o uso e cobertura do solo e a topografia no município de Minaçu-GO (2001). **Ateliê Geográfico**, v. 3, n. 7, p. 93 – 107, 2009.
- NDOSSI, M. I.; AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.
- OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environments**, v. 7, n. 8, 769-779, 1973.
- PIRES, C. A. F.; DAL’ASTA, A. P. Zoneamento geoambiental do perímetro urbano de Santa Maria – RS, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 40, p. 278-290, 2011.

- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010.
- TIAN, Y.; JIM, C.Y.; TAO, Y.; SHI, T. Landscape ecological assessment of green space fragmentation in Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*. Elsevier GmbH, v. 10, p.79-86, 2010.
- TRINDADE, P. M. T.; SALDANHA, D. L.; PEREIRA FILHO, W. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.69, n. 4, p. 837-855, 2017.
- YUAN, F.; BAUER, M. E. Comparison of impervious surface area and normalized difference Vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, xx, p. 1 – 12, 2006.
- vanHOVE, L.W.A.; JACOBS, C. M. J.; HEUSINKVELD, B.G.; ELBERS J.A.; VANDRIEL, B.L.; HOLTSLAG, A.A.M. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. **Build Environ**, 83, p. 91-103, 2015.
- VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.86, p.370-384, 2003.
- WENG, Q.; YANG, S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v.70, n.2, p.145-156, 2004.
- ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Comput. Geosci.** v. 32, p. 1796–1805, 2006.

**CAPÍTULO V. MODELOS DE ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA DO AR PARA
ÁREAS URBANAS A PARTIR DE IMAGENS DO INFRAVERMELHO TERMAL
COM DIFERENTES MÉTODOS DE CORREÇÃO**

MODELOS DE ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA DO AR PARA ÁREAS URBANAS A PARTIR DE IMAGENS DO INFRAVERMELHO TERMAL COM DIFERENTES MÉTODOS DE CORREÇÃO

Patricia Michele Pereira Trindade¹

Gisieli Kramer²

Dejanira Luderitz Saldanha¹

Waterloo Pereira Filho²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP: 90501-970, Porto Alegre - RS, Brasil

patriciatrindade.sr@gmail.com,dejanira.saldanha@ufrgs.br

²Universidade Federal de Santa Maria

Centro de Ciências Naturais e Exatas

Av. Roraima, 1000 - CEP: 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil

gisieli@outlook.com.br; waterloopf@gmail.com

RESUMO

Os problemas gerados no clima urbano mediante o adensamento das cidades são intensificados a partir da substituição de coberturas naturais por áreas construídas. Tal problemática altera a atmosfera local com o aumento da temperatura do ar sentida pela população. Estudos já abordaram que as temperaturas elevadas das cidades afetam a saúde da sua população, bem como as atividades desempenhadas no dia a dia. Neste contexto, pesquisas que tencionem a análise do conforto térmico urbano são de grande relevância. No entanto, um dos principais indicadores do conforto térmico é a temperatura do ar medida, geralmente, em estações meteorológicas distantes da cidade. Uma alternativa para este problema é a obtenção de valores de temperatura do ar, ou pelo menos estimativas aproximadas, a partir de dados alternativos como imagens termais de sensoriamento remoto. Assim, o objetivo da presente pesquisa foi estimar temperatura do ar a partir da integração de pontos fixos de coleta de dados em campo e dados do infravermelho termal considerando diferentes métodos de correção de imagens termais para a área urbana de Santa Maria – RS. Neste sentido, foram adquiridos dados de temperatura do ar (Tar) em campo e temperatura de imagens termais do sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) /Landsat 8 em nove datas distintas, abrangendo as quatro estações do ano. Sequencialmente, foram gerados quatro modelos de regressão linear para estimar a temperatura do ar a partir das imagens. Os modelos foram validados calculando-se os coeficientes de determinação (r^2), índice Willmolt (d), índice *Nash e Sutcliffe* (NSE), erro médio absoluto (EMA) e raiz do erro médio quadrático (REMQ). Os resultados obtidos demonstraram que os quatro modelos apresentaram bom desempenho, no entanto, nos modelos 1, correspondente à relação entre temperatura do ar (Tar) e temperatura de brilho (Tbt) e 3, referente a relação entre temperatura do ar e temperatura de superfície corrigida pelo método *Radiative Transfer Equation* (TSr) os erros de estimativa foram menores, com REMQ de 0,7°C no modelo 1. Neste sentido, os modelos calculados demonstram uma possibilidade para a obtenção de temperatura do ar no meio urbano quando estes dados forem escassos.

Palavras-chave: Imagens termais, Emissividade, Correções atmosféricas, Dados de campo.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental urbana ganha força nas últimas décadas frente ao cenário do planejamento urbano inadequado. Dentre os diferentes problemas relacionados ao crescimento urbano desordenado, destaca-se a alteração do clima urbano, iniciado com a substituição da cobertura da superfície por áreas construídas. Essas alterações na atmosfera local são percebidas, principalmente, pela temperatura do ar. A temperatura mais elevada das cidades pode afetar a saúde da população, assim como rendimento nas atividades físicas e no trabalho (vanHOVE et al., 2015; CHEN et al., 2014; SOUZA et al., 2010).

Neste aspecto, surge a preocupação com o conforto térmico urbano. Conforme Kruger et al., 2013 e STEENEVELD et al., 2011, além da umidade do ar e temperatura radiativa, a temperatura do ar é um dos atributos associado ao conforto térmico. Assim, pode-se citar alguns índices que foram desenvolvidos referentes ao conforto térmico como, índice de temperatura efetiva (T_e) desenvolvido por Thom (1950) e índice de Desconforto (I_d) de Nieuwolt (1997) (MOURA, 2010). Trabalhos mais recentes com esta abordagem foram executados por Buriol et al. (2015) que quantificou o conforto térmico para seres humanos em área natural de Santa Maria-RS. Na pesquisa de Gobo et al. (2018) desenvolveu-se um modelo empírico de conforto térmico humano em climas subtropicais. Cabe destacar que existe a carência de uma rede de instrumentos espacialmente distribuídos de forma eficiente devido à falta de investimentos e problemas técnicos (NÓBREGA et al., 2008) o que compromete as análises em diferentes áreas, principalmente no meio urbano. Desta forma, surge a necessidade de encontrar alternativas para este problema e pode-se dizer que as imagens termais de sensores orbitais podem ser consideradas fortes aliadas.

Os sensores do infravermelho termal registram a radiância emitida pelos diferentes alvos da superfície terrestre e seus valores podem ser convertidos para temperatura de superfície. Esta última, conforme autores Van de Griend e Owe (1993), Valor e Caselles (1996) e Zhang et al. (2006), pode ser obtida quando considerados os valores de emissividade dos alvos da cena imageada. Nesta perspectiva, Weng (2009) destaca que a maioria das investigações consideram os valores de NDVI para o cálculo da emissividade em imagens de satélite. Wang et al. (2015), Rozenstein et al. (2014), Qin et al. (2001), Dash et al. (2002) e Souza e Silva (2005), defendem que, além das correções referentes à emissividade dos materiais, as correções atmosféricas também devem ser consideradas. Neste contexto, existem inúmeras técnicas que possibilitam tais correções, como por exemplo, as fórmulas implementadas no complemento *Land Surface Temperature* (LST) desenvolvido por Ndossi e Advan (2016). Diversos trabalhos foram

desenvolvidos a partir da utilização de imagens do infravermelho termal como em Kumar et al. (2012), Lin e Zhang (2011), Rozenstein et al. (2014), Coelho (2013) e Trindade et al. (2017).

Diante do exposto, destaca-se a importância de estudos da temperatura no meio urbano, principalmente aliando dados de campo e de sensoriamento remoto com imagens termais. Um dos problemas existentes é que, muitas vezes, a distribuição de estações meteorológicas não se dá de forma contínua e com localização próxima da área urbanizada. Neste sentido, as imagens termais são fontes alternativas aos dados de campo, no entanto, a temperatura obtida pelas imagens é de superfície terrestre, e não temperatura do ar.

De acordo com Norman e Becker (1995), em alguns casos, como em áreas muito homogêneas (áreas rurais, superfícies aquáticas) a temperatura das imagens podem equivaler a temperatura do ar. No entanto, áreas heterogêneas, como é o caso do urbano, a situação é mais complexa. Para a análise do conforto térmico torna-se necessário dados de temperatura do ar, assim, é de suma importância o desenvolvimento de pesquisas que busquem meios alternativos de estimativas da variável física supracitada. Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa foi estimar temperatura do ar a partir da integração de pontos fixos de coleta de dados em campo e dados do infravermelho termal considerando diferentes métodos de correção de imagens termais para a área urbana de Santa Maria – RS.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se no centro do estado do Rio Grande do Sul, em uma zona de transição geomorfológica entre a Depressão Central (RS) e o Planalto Meridional Brasileiro (Figura 1). Santa Maria caracteriza-se por apresentar um clima Cfa – classificação de Koppen, quente e úmido apresentando quatro estações bem definidas e considerada uma das cidades mais quentes do Rio Grande do Sul, embora sua temperatura média anual seja baixa em relação à média nacional. O período mais quente compreende ao período de janeiro, média 24,7°C e a temperatura diminui conforme a aproximação dos meses de junho e julho, com média de 13,8°C. A umidade relativa na cidade é elevada o ano todo, caracterizando o clima úmido e com chuvas bem distribuídas (HELDWEIN et al.; 2009; MARCHIORI, 2009; SARTORI, 2009).

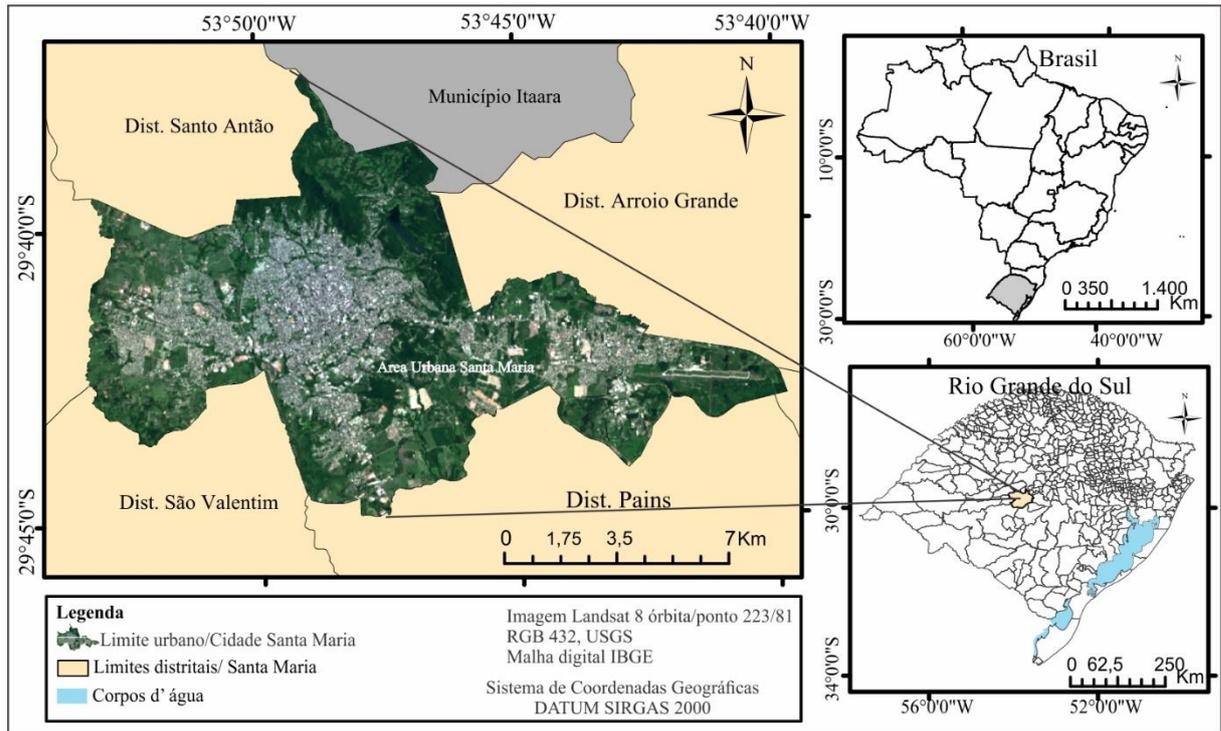


Figura... 1 - Localização da área de estudo

2.2 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento da presente pesquisa foram utilizados materiais referentes a dados orbitais, dados vetoriais, dados de campo, dados meteorológicos, dados da calculadora NASA, e aplicativos para processamento dos dados, como segue:

- Imagens Landsat 8 órbita/ponto 223/81: bandas 2, 3, 4, 5, 6, e 7 em reflectância de superfície; banda 10 em número digital e temperatura de brilho. As imagens foram adquiridas na plataforma *Earth Explorer* (<https://lpsexplorer.cr.usgs.gov/>) referentes às datas 01/04/2017, 20/06/2017, 06/07/2017, 07/08/2017, 11/11/2017, 27/11/2017, 13/12/2017, 15/02/2018 e 22/05/2018;
- Os dados vetoriais consistiram nos limites urbano e municipal da área de estudo adquiridos no formato *shapefile.shp* no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Os dados de campo consistiram na aquisição da temperatura do ar adquiridos a partir de cinco *data loggers* de temperatura distribuídos na área de estudo;

- Os dados meteorológicos referentes à temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica e precipitação foram adquiridos no Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Os dados NASA consistiram na transmitância atmosférica (*atmospheric transmission - t*), radiância ascendente (*upwelling radiance - Lu*), e radiância descendente (*downwelling radiance - Ld*) adquiridos a partir da calculadora NASA (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>);
- Para o processamento das imagens foram utilizados os softwares *Envi 5.5* e *QGIS 2.14*.

2.3 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos da presente pesquisa seguiram 4 processos gerais, a saber: obtenção de dados de campo, correção das imagens termais, estimativa de temperatura do ar, e validação dos modelos de estimativa (Figura 2).

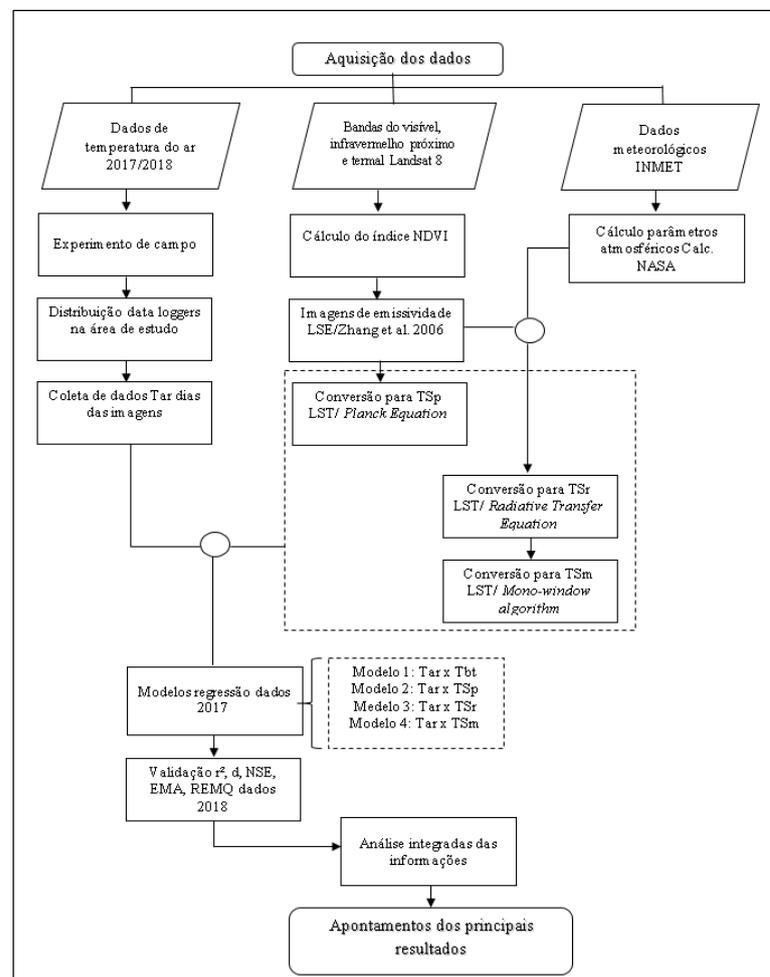


Figura... 2 - Fluxograma do processo metodológico.

2.3.1 Obtenção dos dados de campo

Os dados de campo consistiram em registros de temperatura do ar em diferentes locais na área de estudo. Neste aspecto, foram adquiridos 5 *data loggers* de temperatura do ar, e seguindo padrões da WMO (2008), os equipamentos foram protegidos por abrigos confeccionados para esta pesquisa e instalados a 1,7 m de distância do solo. A aquisição dos dados compreendeu o período de um ano (março/2017 a março/2018), com registros dos dados a cada meia hora pelos *data loggers*.

Para a distribuição (Figura 3) dos instrumentos na área de estudo considerou-se três critérios: distribuição espacial, compreendendo as regiões norte, sul, centro, leste e oeste; as características das áreas; e questões referentes à disponibilidade e segurança dos locais.



Figura... 3 - Distribuição dos data loggers na área urbana de Santa Maria-RS.

2.3.2 Correção imagens termiais

Esta etapa consistiu no cálculo de temperatura de superfície para cada imagem com três diferentes métodos presentes no complemento *Land Surface Temperature* (LST) desenvolvido por Ndossi e Avdan (2016) e disponibilizado no *software QGIS*.

O primeiro método denominado “*Planck Equation*” (Equação 1) considerou como dados de entrada as imagens em temperatura de brilho (adquirida a partir de *download na Earth Explorer*) e de emissividade. As imagens de emissividade foram geradas na ferramenta *Land Surface Emissivity* presente no LST. De acordo com Ndossi e Avdan (2016) o cálculo da imagem de emissividade considera imagens de NDVI (Tabela 1), (Zhang et al. 2006). No estudo desenvolvido por Sobrino et al. (2004) a emissividade obtida a partir dos valores de NDVI apresentaram elevada concordância com as medidas de emissividade in situ, demonstrando um desvio médio de 0,009. O índice de vegetação (NDVI) também foi calculado a partir do LST (Equação 2).

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{\alpha}\right) * \ln \varepsilon} \quad (1)$$

T_b = temperatura de brilho ou aparente registrada pelo sensor em Kelvin;

λ = comprimento de onda médio do infravermelho termal;

α = hc/K = 1.438 x 10⁻² m K, onde:

K = constante de Stefan-Boltzman (1.38 x 10⁻²³ J/K)

h = constante de Planck (6.28 x 10⁻³⁴ J/s)

c = velocidade da luz (2.998 x 10⁸ m/s)

ln ε = logaritmo natural da emissividade da superfície.

Tabela CV 1 - Algoritmo para cálculo de emissividade baseado no NDVI

Valores NDVI	Valores Emissividade
NDVI < -0.185	0.995
-0.185 ≤ NDVI < 0.157	0.985
0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727	1.009 + 0.04 x ln(NDVI)
NDVI > 0.727	0.990

Fonte: adaptado Ndossi e Avdan (2016).

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (2)$$

Onde, ρ_{ivp} = reflectância no infravermelho próximo, ρ_v = reflectância no vermelho.

Para o segundo e terceiro métodos necessitou-se de dados de transmitância atmosférica, radiância ascendente e radiância descendente os quais foram calculados na calculadora NASA com os dados de entrada da Tabela 2.

Tabela CV 2 - Dados de entrada na calculadora NASA.

DATA	Hora	Lat.	Long.	Perfil Atm.	Satélite/sensor	Altitude (Km)	Temp. (°C)	Pressão (mb)	Umidade (%)				
01/04/2017	13:30	-29,724	-53,720	Mid-latitude winter	Landsat8 TIRS B10	0,1	20,40	1011,6	76				
20/06/2017							4,20	1016,7	97				
06/07/2017							17,00	1013,1	66				
07/08/2017							12,20	1005,5	93				
11/11/2017	13:31			Mid-latitude summer			24,00	998,7	48				
27/11/2017							22,40	1002,8	73				
13/12/2017							27,00	1001,6	57				
15/02/2018	13:30						Mid-latitude winter	21,00	1010,3	82			
22/05/2018	13:30										10,2	1011,2	97

Fonte: organizado pela Autora a partir dos Metadados das imagens e INMET, 2017e 2018.

Assim, para o segundo método denominado *Mono-Window Algorithm (MWA)* considerou-se como dados de entrada a transmitância atmosférica, temperatura atmosférica média efetiva - T_a , perfil atmosférico, imagens de temperatura de brilho e de emissividade (Tabela 3). Para o cálculo da temperatura média efetiva considerou-se as relações lineares (Tabela 4) apresentadas por Qin *et al* 2001. Conforme Ndossi e Advan (2016) o algoritmo MWA considera a equação 3 para o cálculo de TS.

Tabela CV 3 - Dados de entrada para o método *Mono-Window Algorithm*.

DATA	Produto Raster	Transmitância	Temperatura atmosférica (K)
01/04/2017	Temperatura de brilho (K), emissividade	0.77	286,75
20/06/2017		0.90	271,99
06/07/2017		0.82	283,65
07/08/2017		0,82	279,28
11/11/2017		0.87	290,03
27/11/2017		0.76	289,75
13/12/2017		0.76	294,01
15/02/2018		0.74	288,46
22/05/2018		0.86	277,45

Fonte: organizado pela Autora.

Tabela CV 4 - Equações para cálculo da Temperatura média atmosférica efetiva (Ta)

Atmosfera	Equação
Mid-latitude Summer	$T_a = 16,0110 + 0,92621 * T_0$
Mid-latitude Winter	$T_a = 19,2704 + 0,91118 * T_0$

Fonte: adaptado Qin et al. 2001. Obs: T0 = a temperatura do ar em K.

$$TS = \frac{a_i(1-C_i-D_i) + [b_i(1-C_i-D_i) + C_i + D_i]T_i - D_iT_a}{C_i} \quad (3)$$

Onde, TS – temperatura de superfície, T_i – temperatura de brilho, temperatura atmosférica média, a_i = -67,355351, b_i = 0,458606. Já os valores de C_i e D_i consideram as equações 4 e 5.

$$C_i = \varepsilon\tau \quad (4)$$

$$D_i = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau] \quad (5)$$

Onde, ε é a emissividade e τ a transmitância atmosférica.

No terceiro método denominado *Radiative Transfer Equation (RTE)* considerou-se como dados de entrada a transmitância atmosférica, radiância ascendente, radiância descendente, imagens de radiância e emissividade (Tabela 5). As Imagens de radiância foram geradas com a ferramenta *Radiance* do LST (Equação 6) a partir da banda 10/TIRS em número digital (ND) e arquivo metadados da imagem. De acordo com Ndossi e Advan (2016), para calcular a temperatura de superfície das imagens, o algoritmo RTE considera uma sequência de equações (7), (8), e (9).

Tabela CV 5 - Dados de entrada para o método *Radiative Transfer Equation*.

DATA	Produto Raster	UP Radiance	Down Radiance	Transmitancia
01/04/2017	Radiância B10, emissividade	1,89	3,05	0,77
20/06/2017		0,67	1,12	0,90
06/07/2017		1,36	2,23	0,82
07/08/2017		1,32	2,14	0,82
11/11/2017		1,08	1,82	0,87
27/11/2017		1,99	3,20	0,76
13/12/2017		2,14	3,44	0,76
15/02/2018		2,15	3,40	0,74
22/05/2018		0,95	1,58	0,86

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L - O_i \quad (6)$$

Onde, L_{λ} – radiância espectral no topo da atmosfera, M_L fator escalar multiplicativo da banda 10 (*metadados*), A_L – fator escalar aditivo da banda 10 (*metadados*), Q_{cal} – valor padrão de calibração, O_i – offset determinado pela USGS, para banda 10 (0,29).

$$L_{\lambda} = [\varepsilon L_{\lambda}(Ts) + (1 - \varepsilon)L_{\lambda_{down}}]\tau + L_{\lambda_{up}} \quad (7)$$

$$L_{\lambda}(Ts) = \frac{L_{\lambda} - L_{\lambda_{up}}}{\tau \varepsilon} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L_{\lambda_{down}} \quad (8)$$

Onde, L_{λ} – radiância de superfície, τ – transmitância atmosférica, ε emissividade, $L_{\lambda_{up}}$ – radiância ascendente, $L_{\lambda_{down}}$ – radiância descendente, $L_{\lambda}(Ts)$ – radiância do corpo negro - temperatura cinética.

$$TS = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_{\lambda}(Ts)} + 1\right)} \quad (9)$$

Onde, TS – temperatura de superfície, K_1 e K_2 – constantes térmicas (*metadados* da imagem).

2.3.3 Estimativa da temperatura do ar a partir de imagens termais (modelos de regressão)

Para esta etapa utilizou-se dados de temperatura do ar dos pontos distribuídos na área de estudo e dados de temperatura de brilho e de superfície extraídos de sete imagens termais para as datas de 01/04/2017, 20/06/2017, 06/07/2017, 07/08/2017, 11/11/2017, 27/11/2017, e 13/12/2017. A partir dos dados citados realizou-se o cálculo de regressão linear simples para estimar a temperatura com imagens termais a partir das seguintes relações: dados de temperatura do ar (T_{ar}) e dados de temperatura de brilho das imagens (T_{bt}), T_{ar} e dados de temperatura de superfície calculados pelo método *Planck Equation* (T_{Sp}), T_{ar} e dados de temperatura de superfície calculados pelo método *Mono-Window Algorithm* (T_{Sm}), e T_{ar} e dados de temperatura de superfície calculados com o método *Radiative Equation* (T_{Sr}), totalizando quatro modelos de regressão linear.

Estudos relacionados à estimativa da temperatura do ar podem ser encontrados em Medeiros et al. (2005), Ribeiro (2008) e Gomes (2017). A partir de 74 estações meteorológicas Medeiros et al. (2005) geraram equações de regressão múltipla para estimar as normais de temperatura média, mínima e máxima anuais para a região Nordeste do Brasil. Estimativa de temperatura do ar a partir de regressão linear utilizando-se como variáveis independentes a

altitude e temperatura de superfície obtida através de imagem ASTER foi desenvolvida em Ribeiro (2008). Na pesquisa realizada por Gomes (2017) foi utilizada imagem termal Landsat8, dentre outras variáveis como altitude e classes de uso da terra, para estimar temperatura do ar em Ubatuba no estado de São Paulo. Cabe destacar que os dois últimos trabalhos citados utilizaram dados de apenas uma data para determinação da temperatura do ar.

De acordo com Callegari-Jaques (2003), a partir da reta de regressão é possível verificar a dependência de uma variável quantitativa em relação à outra com uma equação simples, como também, estimar valores para a variável dependente (y) a partir de valores definidos (até mesmo não observados – dentro da faixa de valores observados para x) da variável independente (x). A equação da reta da regressão linear é dada pela Equação 10.

$$y = a + bx \quad (10)$$

Onde: y = variável dependente (neste estudo a temperatura do ar - Tar); a = coeficiente linear (valor de y quando x=0); b= coeficiente angular (inclinação da reta, acréscimo ou decréscimo de y quando ocorre acréscimo de uma unidade em x); x = variável independente (neste estudo valores de temperatura da imagem).

O cálculo dos coeficientes seguiu o Método dos Mínimos Quadrados, denominado assim, pois procura obter uma reta que apresente as menores distâncias (ao quadrado) entre os valores observados e a reta. Os processos estatísticos foram desenvolvidos do *software Action Stat*, onde as equações 11 e 12 foram utilizadas para definir os parâmetros. (CALLEGARI-JAQUES, 2003).

$$b = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (11)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (12)$$

Para que o modelo de regressão linear seja considerado satisfatório é necessário considerar algumas observações, como: se a variável dependente possui uma distribuição normal, significância da regressão (parâmetro b), análise dos resíduos (distribuição normal e homocedasticidade) (CALLEGARI-JAQUES, 2003; ANDY, 2009; GUJARATI, 2011).

Para verificar se os dados apresentavam distribuição normal, variável dependente ($y - \text{Tar}$) e resíduos da regressão ($\text{Tar observado} - \text{Tar estimado}$), utilizou-se o teste *Kolmogorov - Smirnov*. O teste observa a diferença máxima entre a função de distribuição acumulada, a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados. Assim, compara-se a diferença de um valor crítico para o nível de significância escolhido (PORTAL ACTION, 2018). A estatística utilizada é:

$$D_n = \sup|F(x) - F_n(x)| \quad (13)$$

Onde, $F(x)$ representa a função de distribuição acumulada dos dados; $F_n(X)$ função de distribuição acumulada empírica dos dados. Assim, as hipóteses do teste são:

H0: $F_x = F$ - Os dados seguem uma distribuição normal

H1: $F_x \neq F$ - Os dados não seguem uma distribuição normal

Neste sentido, para que a normalidade dos dados não seja rejeitada o valor de D_n calculado deve ser inferior ao valor crítico tabelado. Neste estudo escolheu-se um α de 0,05, ou seja o valor p-valor calculado deve ser superior a 0,05.

Conforme Callegari-Jaques (2003), o coeficiente b determina a dependência de y em relação a x , só que b é calculado com base em dados amostrais, e não com toda a população de dados. Desta forma, se trata de uma estimativa do coeficiente de regressão populacional (β). Assim, torna-se necessário realizar um teste de hipótese para determinar a existência de regressão, testando a significância do modelo. O raciocínio para o teste considera que β é igual a zero quando não há dependência de y em relação a x . Desta forma, considerou-se as seguintes etapas para o teste:

1. Hipóteses estatísticas:

H0: $\beta=0$, H1: $\beta \neq 0$;

2. Escolha do nível de significância: $\alpha= 0,05$

3. Determinação do valor crítico do teste: $t_{\alpha;gl}$, com $\alpha= 0,05$, gl (graus de liberdade)= $n-2$, onde n é o número de observações.

4. Determinação do valor calculado do teste:

$$t_{\text{calc}} = \frac{b}{EPb} \quad (14)$$

Onde: b = coeficiente angular;

$$EPb = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a \sum y - b \sum xy}{(n-2)(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n})}} \quad (15)$$

Assim, para que H0 fosse rejeitada assumindo a existência de regressão de y sobre x ($\alpha=0,05$) os valores de tcalc deveriam ser superiores aos valores de t.

A análise dos resíduos da regressão é muito importante para verificar se o modelo de regressão é apropriado e é definido como a diferença entre os valores observados e os valores previstos. Para um modelo de regressão adequado, na análise gráfica (resíduos x valores ajustados) deve apresentar distribuição dos pontos de forma aleatória em torno de zero (CALLEGARI-JAQUES, 2003; LEVINE et al., 2005). Outro tipo de análise é o teste de homocedasticidade dos resíduos, a qual é verificada quando a variância dos resíduos for constante para observações diferentes. Quando os resíduos não cumprem esta propriedade, considera-se que os estimadores do modelo não servem para fazer inferência estatística. Neste sentido, para análise de homocedasticidade utilizou-se o teste *Breuch-Pagan* (PORTAL ACTION, 2018), o qual testa a hipótese nula em que a variância dos erros é igual e hipótese alternativa quando a variância dos erros difere para observações distintas.

2.3.4 Validação dos modelos de regressão

Para a validação dos modelos utilizou-se dados de temperatura do ar e de imagens termais para as datas de 15/02/2018 e 22/05/2018, totalizando 10 observações para cada modelo. Para cada conjunto de dados calculou-se quatro indicadores utilizados em estudos como Lopes et al (2014) e Dias Neto et al. (2016) a saber: coeficiente de determinação (r^2) que indica o quanto a variável dependente é explicada pela variável independente, índice *Willmott* (d) (Equação 16) estipula a concordância do modelo, os valores próximos a 1 indicam forte relação (Willmott et al., 1985), índice NSE (Equação 17) verifica o desempenho do modelo (valores superiores a 0,75 atestam bom desempenho) (NASH e SUTCLIFFE, 1970), erro médio absoluto (EMA) (Equação 18) e raiz do erro médio quadrático (REMQ) (Equação 19) que indicam a similaridade entre os dados, valores próximos a zero são os ideais.

$$d = 1 - \frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum (|Pi - O| + |Oi - O|)^2} \quad (16)$$

Onde, d - é o índice de concordância de *Willmott*, Pi - valores estimados, Oi - valores observados O - média dos valores observados.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum(Y_m - Y_c)^2}{\sum(Y_m - \bar{Y}_m)^2} \right] \quad (17)$$

Onde, NSE - coeficiente de *Nash e Sutcliffe*, Y_m - valor medido, Y_c - valor calculado, \bar{Y}_m - média dos valores medidos.

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X'_i - X_i| \quad (18)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X'_i - X_i]^2} \quad (19)$$

Onde, X_i - dados observados, X'_i - dados estimados, N - número pares de pontos utilizados.

2.3.5 Aplicação das equações de regressão em imagens termais

Com as equações de regressão foram geradas imagens de temperatura do ar inserindo cada equação na ferramenta “*band math*” do Envi. Neste sentido, escolheu-se a imagem de 15/02/2018 como teste. Posteriormente, as imagens foram submetidas a um fatiamento em 10 classes de temperatura com intervalo de 2°C. O mesmo fatiamento foi aplicado às imagens de temperatura de brilho e temperatura de superfície referente a cada método de correção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos na presente pesquisa para quatro frentes gerais: estatísticas referentes às imagens termais (sem correção e com correção para os quatro métodos); diferenças encontradas entre as temperaturas das imagens e a temperatura do ar (Tar) registrada no experimento de campo; resultados dos modelos de regressão linear; e validação dos modelos.

A partir das imagens termais foram calculadas as estatísticas para cada data considerada para este estudo (Figura 4). Nas imagens de temperatura de brilho (imagens Tbt), sem correção atmosférica e emissividade, verificou-se que os valores de temperatura foram menores que as

imagens corrigidas. Para as imagens dos meses frios as temperaturas médias foram próximas a 24°C, 17°C, e 18°C para o outono, julho e agosto, respectivamente. Já os meses quentes, novembro, dezembro e fevereiro, verificou-se temperaturas médias de 28°C, 32°C e 26°C respectivamente.

Os valores de temperatura calculados a partir do método “*Planck Equation*” (imagens TSp) foram superiores, em média 1,5°C, em relação aos dados de temperatura de brilho. Nos meses frios as temperaturas médias foram próximas a 25°C para imagem de abril, 19°C na de julho e 20°C em agosto. Nas estações de primavera e verão, verificou-se temperaturas mais elevadas com valores de 30°C em novembro, 34°C na imagem de dezembro e 27°C em fevereiro. Ndossi e Avdan (2016) ao compararem os métodos de correção de imagens termais referentes a *Planck Equation*, *Radiative Transfer* e *Mono-Window Algorithm*, verificaram que os melhores resultados foram identificados para as imagens corrigidas com o primeiro método supracitado. Os autores ainda destacam que a função de *Planck* é a mais fácil de ser utilizada, pois não requer dados atmosféricos durante a passagem do satélite.

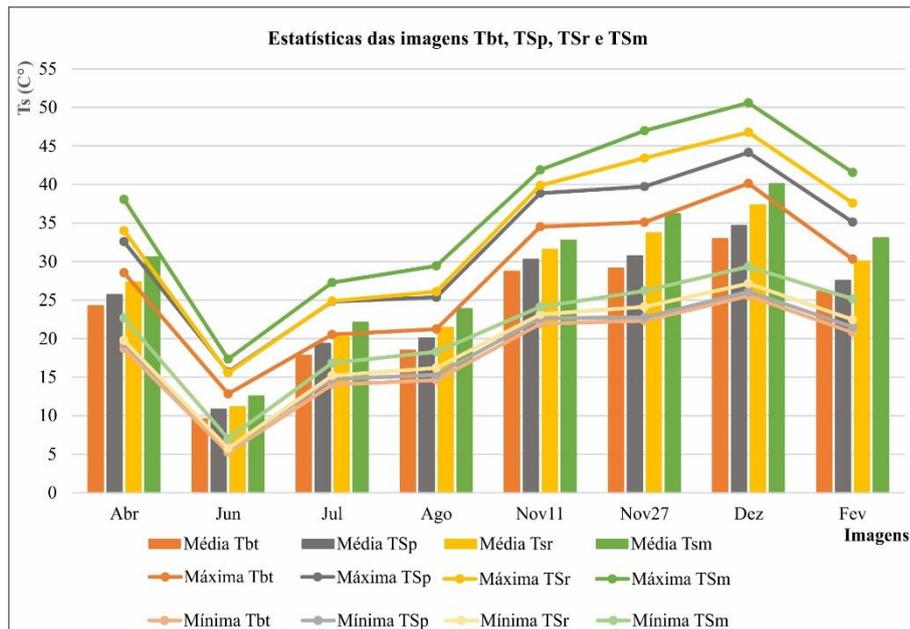


Figura... 4 - Gráfico com estatísticas das imagens de temperatura de brilho (Tbt), temperatura de superfície corrigida pelo método *Planck Equation* (TSp), temperatura de superfície corrigida pelo método *Radiative Transfer Equation* (TSr) e temperatura de superfície corrigida pelo método *Mono-Window Algorithm* (TSm).

Em relação as imagens corrigidas pelo método “*Radiative Transfer Equation*” (imagens TSr) constatou-se que a temperatura foi em média 3,1°C mais elevada que as imagens Tbt e 1,6°C superiores as imagens TSp. As temperaturas médias apresentaram-se mais elevadas e nas imagens de abril, julho e agosto foram, sequencialmente, 27°C, 20°C e 21°C. Já as imagens das

estações mais quentes a temperatura média variou de 30°C para fevereiro até 37°C na imagem de dezembro. Ao analisar as imagens de temperatura de superfície geradas a partir do método *Mono-Window Algorithm* (imagens TSm) verificou-se valores ainda mais elevados, comparando-se com imagens Tbt, foram superiores em média 5,3°C. Em relação as imagens de temperatura de superfície TSp e TSr, os valores de temperatura TSm foram superiores em 3,8°C e 2,1°C respectivamente.

Situação diferente foi encontrada por Ndossi e Advan (2016), pois os valores de temperatura das imagens corrigidas com o método *Radiative Transfer* apresentaram-se superiores que os demais métodos na maioria das observações. Sobrino et al. (2004) ao compararem diferentes correções em imagens Landsat 5 verificaram que os resultados obtidos a partir das correções com o método *Radiative Transfer* (erro médio de 0,57°C) foram melhores do que com o *Mono-Window Algorithm* (erro médio de 2,15°C). No trabalho de Rozenstein et al. (2014), o erro encontrado para imagens Landsat 8 corrigidas pelo método *Mono-Window Algorithm* foi inferior a 0,93°C, contrastando com o estudo supracitado.

Os resultados supracitados consideraram os dados referentes somente às imagens termiais. Assim, tornou-se necessária verificação das diferenças da temperatura das imagens em relação à temperatura do ar (Tar) registrada em cada ponto de campo. A leitura do valor da temperatura das imagens foi realizada para as coordenadas referentes a localização de cada ponto. Desta forma, verificou-se que a média da diferença entre a Tar e a imagem Tbt foi de 2,3°C, já na comparação com as imagens corrigidas as diferenças foram maiores (Tabela 6).

Trabalhos anteriores Peichierrri et al. (2012) e Stisen et al. (2007), Cresswell et al. (1999), Prihodko e Goward (1997) confirmam a relação existente entre a temperatura do ar de até 2 metros de distância do solo com a temperatura observada em imagens de satélite e consideram ser possível realizar a estimativas da temperatura do ar a partir de imagens termiais.

Tabela CV 6 - Estatísticas das temperaturas (pontos de campo) para as nove datas estudadas.

T °C	Tar	Tbt	TSp	TSr	TSm	Tbt -Tar	TSp - Tar	TSr - Tar	TS-Tar
Média	21,35	23,65	26,12	27,40	30,22	2,30	4,77	6,05	8,87
Máx	33,20	35,85	39,46	42,44	45,66	5,85	9,65	12,03	15,15
Mín	6,40	8,85	10,88	11,03	12,44	-1,95	0,36	0,58	2,83

Após a análise dos valores de temperatura encontrados tanto nas imagens termiais quanto nos registros de campo, foram estudadas as relações existentes entre Tar e cada uma das imagens de temperatura (Tbt, TSp, TSr e TSm). Neste sentido, gerou-se quatro modelos de regressão linear: Modelo 1 (Tar x Tbt), Modelo 2 (Tar x TSp), Modelo 3 (Tar x TSr) e Modelo 4 (Tar x

TSm). Conforme Callegari-Jaques (2003), o primeiro passo para iniciar um modelo de regressão linear é verificar se a distribuição de y , variável dependente (no caso valores de Tar), é normal. Neste sentido, com a realização do teste *Kolmogorov-Smirnov* verificou-se que o p -valor calculado (0,1105) foi superior que o α escolhido (0,05), assim confirmou-se a distribuição normal de y (Tar) com nível de significância de 5%.

O modelo 1, calculado a partir das relações entre Tar e Tbt (Figura 5 – a), apresentou coeficientes linear (a) com valor de -0,1597 e angular (b) 0,9056. O coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,94 apresentando uma forte relação entre os dados de acordo com a escala de Pearson.

No modelo 2, obtido a partir da relação de Tar e TSp, (Figura 5 – b), verificou-se coeficiente angular e linear de -1,2530 e 0,8631, respectivamente. O coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,93, ou seja, 93% dos dados de temperatura do ar foram explicados a partir da temperatura de superfície TSp, o que caracterizou forte relação entre os dados.

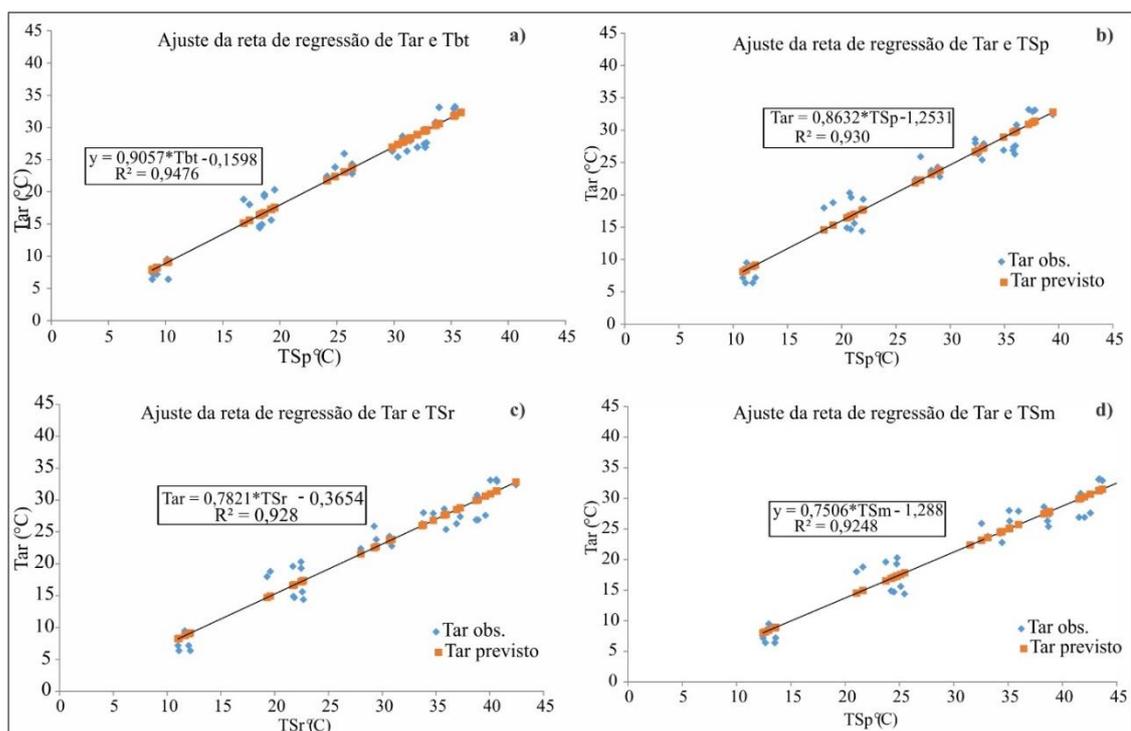


Figura... 5 - Modelos de regressão linear para os dados de temperatura do ar e das imagens: a) Tar x Tbt; b) Tar x TSp; C)Tar x TSr; d) Tar x TSm.

Para o modelo 3, gerado a partir de dados Tar e TSr (Figura 5 – c), constatou-se que o coeficiente linear (a) foi -0,3653 e o coeficiente angular (b) foi de 0,7821. Para este modelo, o coeficiente de determinação (r^2) apresentou valor de 0,92, também considerada uma forte relação entre os dados.

O modelo 4, que contou com dados de Tar e TSm (Figura 5 – d), apresentou coeficientes linear e angular com valores de -1,2879 e 0,7506, respectivamente. Neste modelo, assim como no modelo 3, o coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,92.

De acordo com Callegari-Jaques (2003) e Andy (2009) para um modelo de regressão ser considerado satisfatório é necessário realizar a análise da significância do modelo, coeficiente angular estimado, bem como análise dos resíduos. Na análise dos resíduos devem ser verificadas questões como: distribuição normal e homocedasticidade. Neste sentido, a partir da estatística de avaliação foi possível realizar a avaliação dos modelos gerados. Trabalhos realizados por Medeiros et al. (2005) e Gomes (2017) também utilizaram o teste t a um nível de 5% de significância para modelos de estimativa de temperatura.

A partir das estatísticas t verificou-se que o p-valor calculado foi inferior ao α de 0,05 em todos os modelos. Na análise dos resíduos, os valores do *p-valor* devem ser superiores ao α (0,05) (ANDY, 2009). Neste sentido, os testes *Kolmogorov-Smirnov* e *Breusch-Pagan* comprovaram as hipóteses de distribuição normal e homocedasticidade, respectivamente, o que pode ser verificado também a partir da análise gráfica dos resíduos (Figura 6).

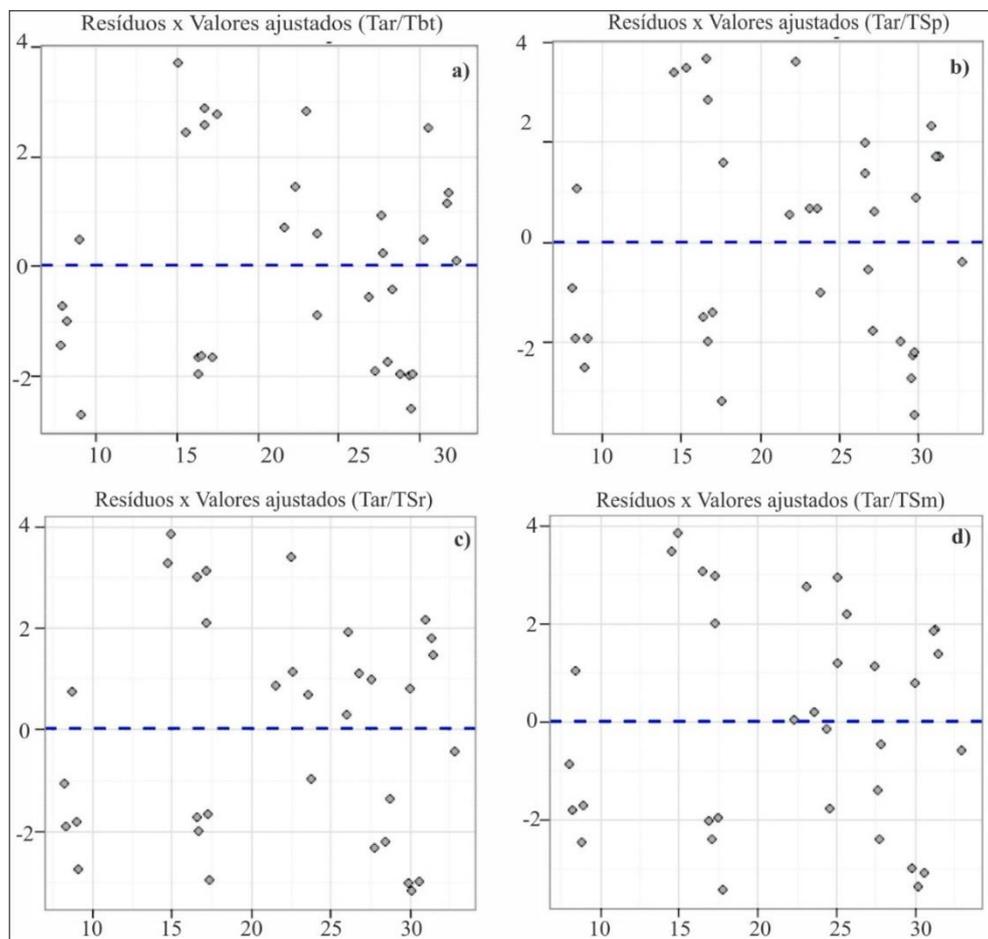


Figura... 6 - Gráfico de análise de resíduos dos modelos: a) Tar x Tbt; b) Tar x TSp; c) Tar x TSr; d) Tar x TSm.

Após as etapas de cálculo e avaliação dos modelos seguiu-se a validação dos mesmos com dados de duas datas distintas, 15/02/2018 e 22/05/2018. O modelo 1 apresentou os melhores resultados na validação, com índice d e NSE de 1 e 0,98, respectivamente. Os erros foram menores em relação aos demais modelos, EMA de apenas 0,58°C e REMQ de 0,77°C, como também coeficiente de determinação mais elevado. Resultados semelhantes foram encontrados por Gomes (2017) e Schuch et al. (2017) sendo o primeiro estudo referente à estimativa de temperatura do ar para o município de Ubarama – SP a partir de imagem termal Landsat 8, entretanto, destaca-se que o modelo gerado considerou dados e imagem de apenas uma data. Na segunda investigação, os autores calcularam modelos para estimativa da temperatura do ar a partir do instrumento SEVERI para área rural e urbana da cidade de Masdar (EAU). O modelo gerado para áreas rurais apresentou erro médio absoluto (EMA) de 1,38°C entre as observações in situ e as estimadas, já o modelo para área urbana mostrou EMA de 1,3°.

Dentre os modelos que consideraram dados e imagens de temperatura de superfície, destaca-se que o modelo 3 apresentou os melhores resultados, embora os modelos 2 e 4 tenham apresentado valores muito próximos. Neste sentido, verificou-se que todos os modelos apresentaram bons resultados nas validações, já que os índices d ficaram próximos a 1 e os erros médios ficaram próximos a 1°C (Tabela 7).

Tabela CV 7 - Índices de validação dos modelos.

	Modelo 1 (Tar x Tbt)	Modelo 2 (Tar x TSp)	Modelo 3 (Tar x TSr)	Modelo 4 (Tar x TSm)
d	1,00	0,99	0,99	0,99
NSE	0,98	0,96	0,97	0,96
EMA	0,58	0,95	0,71	0,95
REMQ	0,77	1,24	1,0	1,26
r ²	0,99	0,96	0,96	0,97

Quando as diferenças entre os dados observados e os estimados foram verificadas individualmente, constatou-se que Tar observada versus Tar estimada (imagem temperatura de brilho) com o modelo 1, 80% das observações apresentaram erros iguais ou inferiores a 0,6°C, em 10% com diferenças superiores a 0,6°C e até 1°C e 10% superiores a 1°C. Peichierri et al. (2012) estimaram a temperatura do ar a 2 metros acima do solo com imagens de temperatura de brilho do sensor MODIS e também observaram erros inferiores a 2°C para Milão – Itália.

Em relação às diferenças entre Tar observada e Tar estimada com imagens de temperatura de superfície, no modelo 2 verificou-se que em 60% das observações os erros foram inferiores a 0,6°C e 30% com valores superiores a 1°C. Para o modelo 3, os erros

observados não ultrapassam 0,6°C em 70% dos pontos, já o modelo 4 apresentou as mesmas porcentagens de erros que o modelo 2. Em estimativas da temperatura do ar geradas a partir dos dados de temperatura de superfície do sensor de moderada resolução MODIS, Vancutsem et al. (2010) encontraram erro médio absoluto de 1,73°C para diferentes regiões da África.

As estatísticas calculadas para os dados de validação dos quatro modelos (Tabela 8) reiteram a constatação de que os modelos apresentaram-se eficientes já que os valores estimados foram semelhantes aos dados de campo.

Tabela CV 8 - Estatísticas dos dados observados e estimados para os pontos de validação.

	Tar obs	Tar est Tbt	Tar est TSp	Tar est TSr	Tar est TSm
Média	19,42	19,03	19,19	19,54	19,62
Máx	26,60	26,24	26,98	27,36	28,04
Mín	12,10	12,02	12,46	12,85	12,40
Dpad	6,45	6,52	6,48	6,57	7,08

Tomando como exemplo as imagens de temperatura de brilho e de superfície para as datas de 15/02/2018 e 22/05/2018 (Figura 7), geradas com as equações de cada modelo (tabela 9) foi possível constatar que as imagens de temperatura de brilho (Tbt) não apresentaram as características da rugosidade das áreas construídas na cidade de Santa Maria. Em contrapartida, as imagens de temperatura de superfície (TSp, TSr e TSm) possibilitaram a melhor análise das diferenças da temperatura no limite considerado. Para as imagens de fevereiro constatou-se o predomínio de temperatura de 24°C a 26°C na imagem Tbt e 24°C a 28°C para imagens TS.

Tabela CV 9 - Equações para estimativa da temperatura do ar a partir de imagens termiais.

Imagem	Equação
Tbt	$Tar=0,9057*Tbt - 0,1598$
TSp	$Tar= 0,8632*TSp - 1,2531$
TSr	$Tar= 0,7821*TSr - 0,3654$
TSm	$Tar= 0,7506*TSm - 1,288$

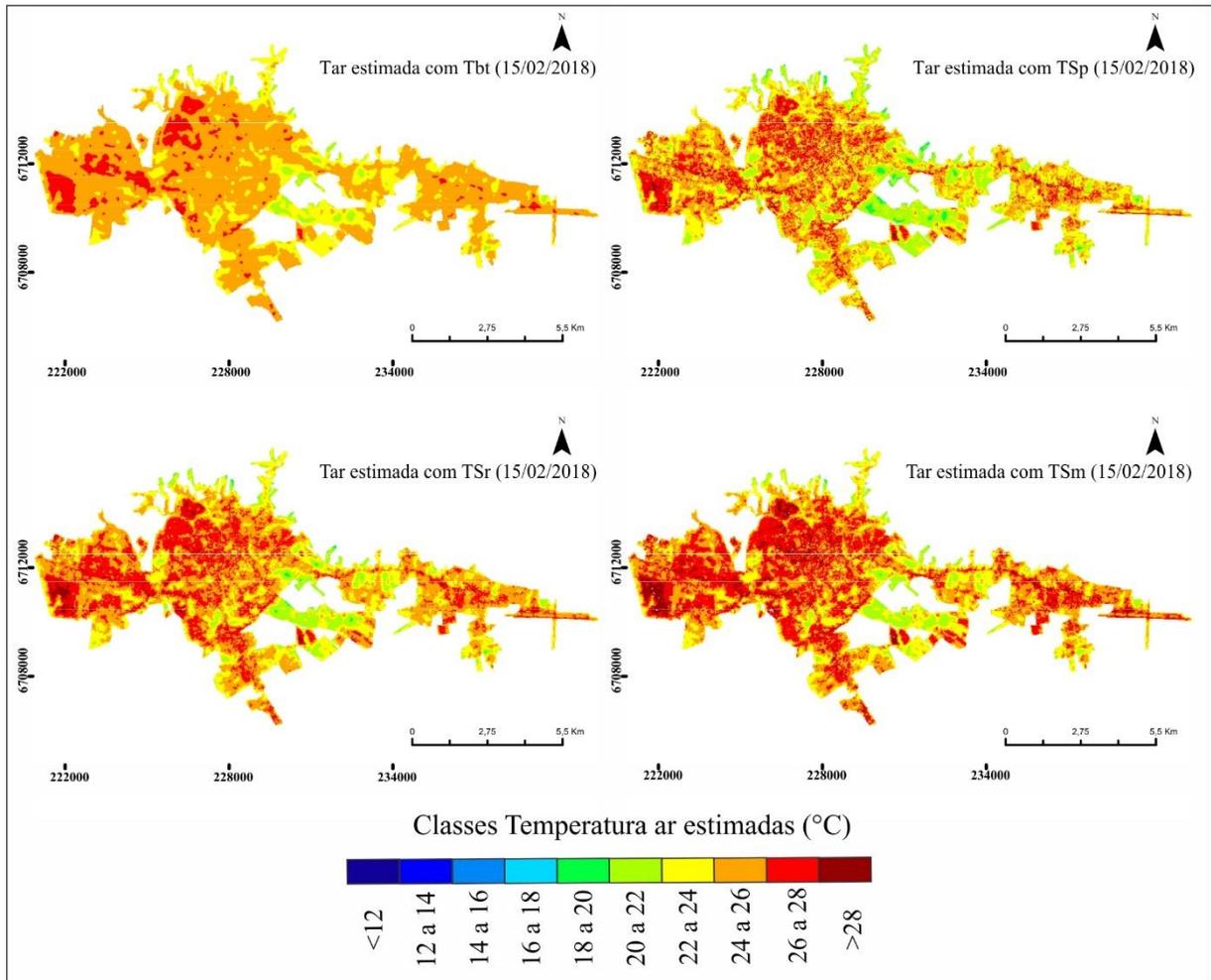


Figura... 7 - Imagens de temperatura para os dias 15/02/2018.

Ao analisar as imagens obtidas por meio das equações de regressão, verificou-se que os dados gerados a partir de imagens corrigidas apresentaram melhor detalhamento espacial da temperatura nas áreas urbanizadas. Cabe destacar que, os modelos gerados consideraram os intervalos de temperatura de 8°C a 35°C (modelo1), 10°C a 39°C (modelo 2), 11°C a 42°C (modelo 3) e 12°C a 45°C (modelo 4). Desta forma, os modelos só podem ser generalizados para estimar Tar a partir de valores que compreendam os intervalos citados.

Os modelos gerados apresentaram bons resultados com coeficientes de determinação (r^2) elevados e REMQ próximos a 1°C o que garante mais eficiência quando comparado a modelos gerados em trabalhos anteriores Stisen et al. (2007), Sun et al. (2005), Czajkowski et al. (2000) e Goward et al. (1994) que estimaram temperatura do ar a partir de imagens termais de diferentes sensores. O modelo gerado por Stisen et al. (2007), por exemplo, o REMQ foi de 3°C e o coeficiente de determinação foi inferior a 0,7. Nas estimativas de temperatura do ar a partir de imagens MODIS, Sun et al. (2005) também encontraram diferenças entre os dados estimados e observados próximos a 3°C.

4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da presente pesquisa permitiu estabelecer algumas conclusões acerca da utilização integrada de dados de campo e orbitais para a área urbana de Santa Maria – RS. Em relação às correções das imagens termais, verificou-se que as imagens corrigidas com o método *Mono-Window Algorithm* apresentaram valores mais elevados de temperatura, em contrapartida, as imagens de temperatura de brilho exibiram os menores valores. A temperatura do ar medida em campo foi inferior à temperatura dos quatro tipos de imagens consideradas, ou seja, nas áreas urbanas, a temperatura de superfície tende a ser superior a temperatura do ar. Quando considerada apenas a imagem de temperatura de brilho, as diferenças podem chegar até 5°C.

Em relação aos modelos de estimativa de temperatura do ar constatou-se que todos apresentaram bons resultados, com índices d, NSE e coeficientes de determinação elevados o que demonstrou a aplicabilidade dos modelos quando as estimativas foram generalizadas. No entanto, foi possível verificar que os modelos 1 (Tar x Tbt) e 3 (Tar x TSr) se destacaram positivamente ao apresentarem os menores erros entre os dados observados e os dados estimados. Nos dados de temperatura do ar estimados a partir do modelo 1 verificou-se REMQ de 0,7°C, representando os dados estimados mais próximos dos dados de campo. A vantagem da utilização deste modelo é que o processamento das imagens de temperatura é simples uma vez que exige-se apenas a conversão dos valores de kelvin para celsius. A partir do modelo 3 observou-se que os REMQ entre os dados de campo e os estimados foi de 1°C, e a vantagem de utilizar este método de estimativa está no grau de detalhe quando consideradas a análise espacial da temperatura.

Os resultados alcançados com o presente estudo confirmam a relevância da utilização de imagens orbitais para análises urbanas. Os modelos apresentados demonstraram uma alternativa para a obtenção de temperatura do ar no meio urbano quando estes dados forem escassos. Cabe destacar que, os modelos ainda podem ser melhorados a partir da inserção de novas variáveis que influenciem na temperatura, bem como um maior número de observações. Destaca-se também, que os modelos foram testados apenas para a cidade de Santa Maria, assim considera-se necessário validações em cidades com características ambientais diferentes.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, H. O clima urbano- natureza, escalas de análise e aplicabilidade. Finisterra. **Revista Portuguesa de Geografia**, v. 80, p.66-91, 2005.

ANDY, F. **Descobrimo a estatística usando SPSS**: Tradução Lorí Viali. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

BARSI, J.A.; SCHOTT, J.R.; HOOK, S.J.; RAQUENO, N.G.; MARKHAM, B.L.; RADOCINSKI, R.G. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. **Remote Sensing**, 6, 11607–11626, 2014.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V; RIGHI, E. Z.; BRESSAN, V. C. Conforto térmico para os seres humanos nas condições de ambiente natural em Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Rural**, v. 45, n. 2, p. 223-230, 2015.

CALLEGARI-JAQUES, S. M. **Bioestatística**: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003.

COELHO, A. N. Temperatura de superfície celsius do sensor TIRS/Landsat – 8: metodologia e aplicações. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 7, n.1, p. 31 – 45, 2013.

CHEN, D.; WANG, X.; THATCHER ,M.; BARNETT , G.; KACHENKO, A.; PRINCE, R. Urban Vegetation for reducing heat related mortality. **Environ Pollut**, 192, p.275-284. 2014.

CRESSWELL, M.; MORSE, A.; THOMSON, M.; CONNOR, S. Estimating surface air temperatures, from meteosat land surface temperatures, using an empirical solar zenith angle model. *Int. J. Remote Sensing*, 20, p. 1125–1132, 1999.

CZAJKOWSKI, K. P., GOWARD, S. N., STADLER, S. J., & WALZ, A. Thermal remote sensing of near surface environmental variables: Application over the Oklahoma Mesonet. **Professional Geographer**, 52, p. 345–357, 2000.

DASH P, GOTTSCHKE FS, OLESEM FSH & FISCHER H. 2002. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. **International Journal of Remote Sensing**, 23, 2563–2594, 2002.

DIAS NETO, J.; Thomaz Júnior, J. C.; Urbano Neto, D. F. Método de ajuste matemático para validação de dados sensores de radiação de onda longa. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n1, p. 37 - 44, 2016.

GOBO, J. P. A.; FARIA, M. R.; GALVANI, E. GONÇALVES, F. L.T.; MONTEIRO, L. M. Empirical model of human thermal comfort in subtropical climates: a first approach to the Brazilian Subtropical Index (BSI). **Atmosphere**, n. 9, p. 1-16, 2018.

GOMES, W. P. **Características da temperatura na zona costeira**: análise do clima urbano em Ubatuba – SP. Tese de doutorado. Universidade Estadual de São Paulo. Presidente Prudente, 2017.

GOWARD, S. N., WARING, R. H., DYE, D. G., YANG, J. L. Ecological remote-sensing at OTTER — satellite macroscale observations. **Ecological Applications**, 4, 322–343, 1994.

GUJARATI, D. N. **Econometria Básica**. 5 ed. Porto Alegre: Makron Books Brasil, 2011.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência&Ambiente**, n. 38, p.43-59, 2009.

van HOVE, L.W.A.; JACOBS, C. M. J.; HEUSINKVELD, B.G.; ELBERS J.A.; VANDRIEL, B.L.; HOLTSLAG, A.A.M. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. **Build Environ**, 83, p. 91-103, 2015.

KRUGER E, DRACH P, EMMANUEL R, CORBELLA O: Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK. **Theor Appl Climatol**, 112(1–2), p. 127-141, 2013.

LEVINE, D. N.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T. C.; BERENSON, M. L. **Estatística – teoria e aplicações** usando o Microsoft Excel em português. Rio de Janeiro, ed. 3: LTC, 2005.

LIN, L.; ZHANG, Y. Urban heat island. Using the Landsat TM data and ASTER data: a case study in Hong Kong. **Remote Sensing**, 3, p. 1535 – 1552, 2011.

LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13 – 19, 2014.

MARCHIORI, J. N. A vegetação em Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, n. 38, p.93-112, 2009.

MEDEIROS, S. S.; CECÍLIO, R. A.; MELO JÚNIOR, J. C. F; SILVA JÚNIOR, J. L. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n.2, p. 247 – 255, 2005.

MOURA, M. de O. et al. Conforto térmico em Fortaleza-CE. **Revista da ANPEGE**, v.6, n.6, p.177-189, 2010.

NASA. **Atmospheric Correction Parameter Calculator**. Disponível em: <<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>> Acesso: 20 junho 2018.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V.: River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.

NDOSSEI, M. I.; AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.

NÓBREGA, R.S.; SOUZA, Ê.P.; GALVÍNCIO, J.D. Análise da estimativa de precipitação do TRMM em uma Sub-bacia da Amazônia Ocidental. **Revista de Geografia**, v. 25, n. 1, p. 6-20, 2008.

NORMAN, J. M.; BECKER, F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 77, n. 3-4, p. 153 – 166, 1995.

PICHIERRI, M.; BONAFONI, S.; BIONDI, R. Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 130 – 138, 2012.

PORTAL ACTION. Regressão linear: análise de resíduos. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/analise-de-regressao/analise-dos-residuos>> Acesso: 02 junho 2018.

PRIHODKO, L.; GOWARD, S.N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. **Remote Sensing Environmental**, 60, p. 335–346, 1997.

QIN, Z.-H.; KARNIELI, A.; BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **Int. J. Remote Sensing**, 22, 3719–3746, 2001.

RIBEIRO, J. da C. **Índice composto de qualidade de vida urbana** – aspectos de configuração espacial, socioeconômicos e ambientais urbanos. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

ROZENSTEIN, O.; QUIN, Z.; DERIMIAN, Y.; KARNIELI, A. Derivation of land surface temperature for Landsat 8 TIRS using a Split Window Algorithm. **Remote Sensing**, 14, p. 5768 – 5780, 2014.

SARTORI, P. L. P. Geologia e Geomorfologia de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**. Santa Maria, n. 38, p.19-43, jan./jun. 2009.

SCHUCH, F.; MARPU, P.; MASRI, D.; AFSHARI, A. Estimation of urban air temperature from a rural station using remotely sensed thermal infrared data. **Energy Procedia**, v. 143, p. 519 – 525, 2017.

SILVA, E. N.; RIBEIRO, H.; SANTANA, P. Clima e Saúde em Contextos Urbanos: Uma Revisão da Literatura. **Biblio 3W**, Barcelona, v. 19, n.1092 p.1-27. 2014.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 434 – 440, 2004.

SOUZA, A. de; PAVÃO, H. G.; LASTORIA, S. G. G.; CAVAZZANA, G. H.; PARANHOS FILHO, A. C. Modelo de Thom para o zoneamento bioclimático de Mato Grosso do Sul. **Revista de Geografia Norte Grande**, v.46, p.137-147, 2010.

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

STEENEVELD, G. J.; KOOPMANS, S.; HEUSINKVELD, B. G.; van HOVE, L. W. A.; HOLTSLAG, A. A. M. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, p. 1 - 14, 2011.

STISEN, S.; SANDHOLT, I.; NORGAARD, A.; FENSHOLT, R.; EKLUNDH, L. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. **Remote Sensing Environmental**, 110, p. 262–274, 2007.

SUN, Y. J.; WANG, J. F.; ZHANG, R. H.; GILLIES, R. R.; XUE, Y.; BO, Y. C. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 80, p. 37 – 48, 2005.

TRINDADE, P. M. T.; SALDANHA, D. L.; PEREIRA FILHO, W. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.69, n. 4, p. 837-855, 2017.

VANCUTSEM, C.; CECCATO, P.; DINKU, T.; CONNOR, S. J. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in diferente ecosystems over Africa. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 449 – 465, 2010.

VALOR, E.; CASELLES, V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South Americas areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 167 – 184, 1996.

VAN de GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119 – 1131, 1993.

USGS. **Using the USGS Landsat 8 Product**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php> Acesso: 1 fevereiro 2018.

USGS. **Landsat 8 (L8) Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/calibration_notices.php> Acesso: 1 fevereiro 2018.

WANG, F.; QIN, Z.; SONG, C.; TU, L.; KARNIELI, A.; ZHAO, S. An improved Mono-Window Algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. **Remote Sensing**, 7, p. 4268 – 4289, 2015.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing or urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, p. 335 – 344, 2009.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, C. M.; O'donnell, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. WMO n°8, 2008.

ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Comput. Geosci.** v. 32, 1796–1805, 2006.

CAPÍTULO VI. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir das metodologias empregadas no desenvolvimento da presente pesquisa foi possível atender o objetivo geral que consistiu em **analisar a variação espaço temporal da temperatura e ilhas de calor na área urbana do município de Santa Maria - RS, levando em consideração as suas características ambientais (relevo, vegetação, áreas construídas) e as relações entre dados orbitais e de campo**. A utilização de produtos de sensoriamento remoto juntamente com o registro de temperatura em campo a partir da implantação de pontos fixos permitiu apontar as principais características do campo térmico da área urbana e suas diferenças quanto ao meio rural. Neste sentido, as imagens orbitais, apesar da média resolução espacial, possibilitaram o estudo da cidade identificando áreas que necessitam de mais atenção por parte dos gestores públicos.

Em relação à análise temporal da temperatura (1994 a 2014) foi possível observar o aumento de áreas com temperatura de superfície mais elevada para todas as estações do ano o que pode ser justificado pelo incremento de áreas construídas na cidade. A classificação das imagens Landsat permitiu identificar uma taxa de crescimento de 70% entre 1994 e 2014 e as imagens termais demonstraram as consequências na temperatura de superfície. De modo geral a temperatura foi mais elevada nas superfícies urbanas, embora algumas áreas de solo exposto também apresentassem temperaturas extremas. Em contrapartida, em todas as imagens analisadas, áreas com vegetação apresentaram temperatura mais amena. As ilhas de calor com valores superiores a 3°C (forte magnitude) exibiram uma tendência de aumento ao longo da série estudada, entretanto, foram mais expressivas nos meses de novembro e janeiro. As regiões que apresentaram maior ocorrência deste fenômeno foram: oeste (proximidades dos bairros Tancredo Neves e Juscelino Kubistchek), região central (bairro Centro), e região leste (aeroporto localizado no bairro Camobi).

A partir da caracterização sazonal (2017/2018) da temperatura em áreas selecionadas no meio urbano e rural foi possível identificar as principais diferenças térmicas entre estes dois meios e destacar a possibilidade de análise integrada dos dados termais e de campo. A metodologia adotada no experimento de campo demonstrou-se eficiente, já que permitiu verificar a possibilidade de construção de abrigos de baixo custo para proteção de instrumentos registradores da temperatura do ar. Neste aspecto, pode-se dizer que os abrigos mostraram ótimo desempenho ao serem comparados com o abrigo modelo disponibilizado pelo laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria. Ao considerar as médias da

temperatura do ar, verificou-se os valores mais elevados nas áreas urbanas em comparação com as rurais, destacando que o ponto T1 localizado em área residencial e com pouca arborização apresentou as maiores diferenças. Em contrapartida, o ponto T5 localizado em área residencial arborizada apresentou menor diferença em relação à temperatura média rural para todas as estações. Quando a temperatura média dos pontos urbanos foram comparadas aos dados do ponto T3 localizado em área rural, com densa cobertura vegetal, as diferenças observadas foram ainda mais significativas. Este resultado reitera a importância da cobertura vegetal como reguladora e amenizadora da temperatura nas áreas urbanas.

Seguindo na comparação entre urbano e rural, foi possível constatar a maior amplitude da temperatura urbana e rural nos períodos da noite e madrugada, principalmente nas estações da primavera e verão. Nas estações do outono e inverno também foi verificada esta constatação, no entanto, as diferenças foram menores. Nos períodos da manhã e tarde a diferença de temperatura entre o urbano e rural foram ínfimas e quase inexistentes em alguns casos. Ao considerar a comparação entre os valores de temperatura do ar e temperatura de superfície verificou-se que, de modo geral, os valores das imagens foram superiores ao do campo. As diferenças mais elevadas foram identificadas nos pontos localizados no meio urbano, destacando que nas áreas rurais a temperatura do ar foi muito próxima a temperatura de superfície.

A avaliação da temperatura e ilhas de calor urbanas juntamente com as características do relevo e vegetação da cidade demonstrou a importância da análise do clima em conjunto com características ambientais. Neste aspecto, a integração de diferentes produtos de sensoriamento remoto (Landsat 8, Sentinel 2A e SRTM) possibilitou uma análise mais consistente e eficiente. Com a compartimentação fisiográfica delimitada a partir das classes de hipsometria e grau de ocupação verde foi possível identificar diferentes áreas quanto as suas características físicas e térmicas.

Em relação à cobertura vegetal, pode-se dizer que as imagens Sentinel, por apresentarem melhor resolução espacial, possibilitaram a melhor identificação da vegetação no meio urbano. Neste caso, foram identificadas três classes quanto ao grau de ocupação verde da cidade. A classe grau 1 correspondeu às áreas densamente edificadas e sem vegetação, a classe grau 2 representou as regiões residenciais com algum tipo de vegetação, já nas áreas correspondentes ao grau 3 apresentaram densa cobertura vegetal. Desta forma, verificou-se que a maioria das superfícies da cidade corresponderam as classes 1 e 2, a primeira mostrou as superfícies de maior temperatura e a segunda com valores mais amenos, entretanto, os valores mais baixos de temperatura foram encontrados para o grau de ocupação verde 3.

A partir das imagens termais Landsat 8 constatou-se ilhas de calor de fraca à forte magnitude relacionadas às áreas construídas e áreas com ilhas de frescor de média magnitude em superfícies vegetadas. Quanto ao recorte temporal, assim como na análise 1994 a 2014, as ilhas de calor foram mais proeminentes nas estações da primavera e verão e na análise espacial também foram identificadas as mesmas áreas com maior ocorrência de temperaturas mais elevadas, no caso de alguns locais das regiões oeste, centro, nordeste e sudoeste. As áreas referentes a região oeste correspondem ao bairro Tancredo Neves caracterizado por área residencial densamente edificada e com pouca arborização. A região central, apesar de apresentar algumas praças arborizadas é densamente edificada. As áreas da região sudoeste correspondem aos conjuntos residenciais Moradas, localizados no bairro Diácomo João Luiz Pozzobon, caracterizados por residências muito próximas e sem arborização.

Nas relações da temperatura com o relevo e vegetação verificou-se que os valores mais elevados de temperatura foram identificados no intervalo de 60 a 100 metros de altitude e nas áreas com grau de ocupação verde 1 a temperatura foi superior às áreas com grau de ocupação verde 3. A compartimentação fisiográfica da cidade quanto a hipsometria e grau de ocupação verde possibilitou a identificação de nove classes dentro do limite das áreas construídas. Neste sentido, a temperatura média foi mais elevada conforme o aumento do número da classe, ou seja, nas áreas referentes à classe 1 (grau de ocupação verde 3 e hipsometria 150 a 200 metros) a temperatura foi mais amena do que nas áreas da classe 9 (grau de ocupação verde 1 e hipsometria 60 a 100 metros). Neste aspecto, nas áreas da classe 1 foram verificadas ilhas de frescor e nas da classe 9, ilhas de calor.

Diante dos resultados citados é evidente a importância que pesquisas desta natureza representam para a aquisição de informações que contribuam para os planos de desenvolvimento das cidades, destacando que os aspectos do clima urbano interferem significativamente no conforto térmico da população. Um dos principais fatores determinantes para a análise do conforto térmico é a temperatura do ar. No entanto, como discutido nesta pesquisa, a maioria das áreas urbanas carecem dessas informações, pois, geralmente, as estações meteorológicas encontram-se instaladas em áreas que não representam a realidade urbana. Neste contexto, pode-se dizer que o estudo de modelos para estimativa da temperatura do ar a partir de dados termais é a alternativa para suprir o problema da falta de registro de dados.

Como não existe um consenso sobre a melhor metodologia para processamento das imagens termais Landsat, considerou-se importante o estudo das relações entre dados de campo e dados termais calculados a partir de diferentes métodos de correção. Desta forma, foram considerados valores das imagens em temperatura de brilho (Tbt - adquiridas diretamente no

Earth Explorer), imagens em temperatura de superfície corrigidas pelos métodos *Planck Equation (TSp)*, *Radiative Transferer Equation (TSr)* e *Mono-window Algorithm (TSm)* todos disponíveis na ferramenta LST no *software* QGIS. Neste sentido, verificou-se que as imagens TSm apresentaram valores mais elevados de temperatura em comparação com as demais (Tbt, TSp e TSm), já as imagens Tbt apresentaram os valores mais baixos. Em relação às diferenças entre dados de campo (Tar) e imagens, constatou-se que as diferenças foram menores entre Tar e Tbt e mais elevadas entre Tar e TSm.

A partir destas relações foram definidos os quatro modelos de regressão linear para estimativa da temperatura do ar: Modelo 1 (Tar x Tbt), Modelo 2 (Tar x TSp), Modelo 3 (Tar x TSR) e Modelo 4 (Tar x TSm). Neste caso, constatou-se que todos os modelos apresentaram bom desempenho, entretanto, o modelo 1 exibiu melhores resultados na validação com EMA e REMQ de até 0,8°C. Neste sentido, embora as diferenças tenham sido pequenas, dentre os modelos com imagens corrigidas, o modelo 3 apresentou os melhores resultados. É importante destacar, que os modelos gerados só podem ser generalizados para valores de temperatura compreendidos dentro dos intervalos considerados nesta pesquisa: 8°C a 35°C (modelo 1), 10°C a 39°C (modelo 2), 11°C a 42°C (modelo 3) e 12°C a 45°C (modelo 4). As validações foram realizadas somente para a área de estudo, desta forma é recomendada a validação em outras áreas e em diferentes períodos do ano para estudos futuros.

Os resultados alcançados demonstraram a importância dos dados de sensoriamento remoto na análise da cidade. A partir da integração com dados de campo (pontos fixos de coleta de dados) foi possível identificar as diversas características da área de estudo, bem como auxílio na identificação de áreas que podem apresentar problemas quanto ao conforto térmico da população. Neste sentido, destaca-se que as metodologias empregadas podem ser aplicadas em diferentes cidades, considerando suas particularidades. Os modelos gerados podem servir de alternativa para obtenção de valores próximos a temperatura do ar. Neste caso, sugere-se que em trabalhos futuros os referidos modelos sejam complementados com inserção de novas variáveis que influenciam na temperatura do ar, bem como a realização de testes em um maior conjunto de dados. Desta forma, pode-se constatar que as metodologias apresentadas e os resultados alcançados representam significativa contribuição para o estudo do ambiente urbano a partir das suas características de superfície e temperatura.