

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSEMAR PEREIRA DA SILVA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE DO AGLOMERADO
URBANO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA DURANTE OS ANOS DE
1985 A 2010 A PARTIR DO SATÉLITE LANDSAT-5

CURITIBA
2014
M

JOSEMAR PEREIRA DA SILVA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE DO AGLOMERADO
URBANO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA DURANTE OS ANOS DE
1985 A 2010 A PARTIR DO SATÉLITE LANDSAT-5

Dissertação apresenta como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Geografia, no
Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor
de Ciências da Terra, Universidade Federal do
Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dra. Sony Cortese Caneparo
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Vedor de Paula

CURITIBA
2014



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo (a) candidato (a) JOSEMAR PEREIRA DA SILVA intitulada "ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE DO AGLOMERADO URBANO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA DURANTE OS ANOS DE 1985 A 2010 A PARTIR DO SATÉLITE LANDST-5", para obtenção do grau de Mestre em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração Espaço, Sociedade e Ambiente, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise Ambiental.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o (a) candidato (a), são de parecer pela reprovação da Dissertação.
Curitiba, 14 de abril de 2014.

Nome e Assinatura da Banca Examinadora:

Profª. Drª. Sony Cortese Caneparo – orientadora

Prof. Dr. Eduardo Vedor de Paula – co-orientador - PPGGEO/UFPR

Profª. Drª. Erika Collischon – UFPEL

Prof. Dr. Marciel Lohmann - SIMEPAR

S586a Silva, Josemar Pereira da

Análise do comportamento térmico da superfície do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba durante os anos de 1985 a 2010 a partir do satélite LANDSAT-5 / Josemar Pereira da Silva. – Curitiba, 2014.

169f. : il. [color.], tab.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia.

Orientadora: Sony Cortese Caneparo.

Coorientador: Eduardo Vedor de Paula.

Bibliografia: p. 162-169.

1. Climatologia urbana - Curitiba. 2. Landsat (Satelites). 3. Sensoriamento remoto. I. Universidade Federal do Paraná. II. Caneparo, Sony Cortese. III. Paula, Eduardo Vedor de. IV. Título.

CDD: 551.6981621

Dedico à minha família.

Em especial aos meus pais Getúlio e Geny
e esposa Carolina.

História, nossas histórias
Dias de luta, dias de glória
Alexandre Magno Abrão (Chorão)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná por proporcionar o ambiente de formação.

Ao Programa de Pós Graduação em Geografia da UFPR pela oportunidade de aprendizado.

À Prof^a Sony Cortese Caneparo pelas orientações e dedicação dispensados na dissertação e pela amizade cultivada.

Aos Professores Hideo Araki, Marciel Lohnann e Erika Collischonn pela participação nas bancas de qualificação e de defesa da dissertação com importantes contribuições sugeridas.

À secretaria de Pós-Graduação em Geografia da UFPR, nas pessoas de Luiz Carlos Zem e Adriana Cristina Oliveira, pela competência nos exercícios de sua função, pela disposição em ajudar e amizade cultivada.

Ao Professor, amigo, colega de trabalho, coorientador e colega de time de futebol Eduardo Vedor de Paula pelas inúmeras sugestões, sendo as mais marcantes a graduação e pós-graduação em geografia.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Geografia.

Ao Professor, amigo, colega de trabalho, chefe coordenador de projeto, orientador de graduação Claudinei Taborda da Silveira pelos tantos ensinamentos e discussões acerca de tudo que envolve a ciência geográfica e entretenimento e pela disponibilização dos recursos do LAGEO.

A todos os professores do curso de graduação em geografia, em especial aos professores(as) Elaine, Inês, Tony e Irani.

Aos colegas de pós-graduação Marcelo Bordin, Kléber Manske, Juliano Andres, Ana Paula MS Vaz e Patrícia Baliski.

As amigas cultivadas desde o período de graduação, em especial a Carolina Deconto, Zé Roberto, Ana Paula Mikosik, Maurielle Félix e Ricardo Silveira.

Aos amigos e colegas de trabalho que me ajudaram e muito para elaboração deste trabalho, cronologicamente: Edenilson, Nataniel e Paulo Henrique.

Ao novo amigo e sócio André Silva pela ajuda na fase final deste trabalho.

As muitas amizades cultivadas e proporcionadas pela UFPR.

A todos os colegas de trabalho da UFPR, em especial pelas palavras de incentivo e apoio recebidas durante o período de elaboração desta dissertação por Jû Macedo, Sarita, Rômulo, Elaine, Zézinho, Heloisa, Albani, Juarez Balão, Zem (novamente), colegas da CIS e do CCE, entre muitos outros.

A todas as gerações de colegas de LAGEO/NUGEO, em especial a Clotilde, Prof. Pio Fiori e Chisato, sem esquecer dos ensinamentos em geoprocessamento recebidos dos colegas Zé Kepel, Raimundo, Rodrigo Folador e Antonio.

Vida longa aos Mercenários e a Cúpula!

Agradeço a minha irmã Meire Helen e Jackson pelas palavras de apoio.
, Ao Quarteto Fantástico (Kathleen, Larissa, Bruna e Laura) minhas lindas sobrinhas, pelo amor recebido.

A minha querida sogra Reni pelo amor e apoio recebidos.

Em especial agradeço aos meus pais Getúlio e Geny por tudo que fizeram e ainda fazem por mim. Não tenho palavras para descrever a gratidão e orgulho que sinto de vocês! Espero um dia recompensa-los e superar o esforço de vocês.

E por fim, um agradecimento mais que especial a minha amada esposa Carolina pelo carinho, apoio, incentivo e compreensão pelos momentos de ausência (que foi suprida pela cia do Mingau) e por sempre estar disposta em me ajudar.

RESUMO

A temperatura da superfície terrestre está diretamente relacionada às características dos materiais que a compõem e sua interação com a radiação eletromagnética refletida e emitida sobre diferentes geometrias que variam ao longo do tempo e do espaço. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento térmico da superfície do Aglomerado da Região Metropolitana de Curitiba (AU-RMC) durante os anos de 1985 a 2010, tendo como finalidade compreender a relação entre as formas de ocupação urbana e a temperatura de superfície (TS) em diferentes condições de insolação, as quais podem ser detectadas por sensoriamento remoto. Para atender este objetivo, empregou-se neste estudo o uso de imagens captadas pelo satélite Landsat-5. As modificações da cobertura da superfície foram detectadas pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com o intuito de identificar a intensidade da cobertura vegetal e por contraste as áreas com ausência desta. A TS foi obtida a partir da banda 6 (infravermelho termal) com base no inverso da Lei de Planck. Para interpretação da TS foram empregados os dados disponíveis das estações meteorológicas de Curitiba e Pinhais/PR. Durante os anos de 1985 a 2010, observou-se a redução da vegetação e significativo aumento de TS para estas áreas. No contexto sazonal, os resultados revelam dois padrões térmicos para a superfície do AU-RMC, apresentando maior amplitude térmica entre as superfícies para os dias relativos à primavera/verão e uma menor amplitude para os dias de outono/inverno. Em detalhe, foi observado que as áreas mais adensadas horizontalmente representam as TS mais elevadas, formando ilhas de calor de superfície (ICS) mais intensas em relação às circundantes. As áreas vegetadas atuaram como ilhas de frescor de superfície (IFS). Para avaliação da remoção dos efeitos causados pela atmosfera comparou-se o método adotado neste estudo com um método com correção atmosférica para o dia 19/11/2010. No geral, os resultados fornecem subsídios para uma melhor compreensão do clima urbano de cidades que apresentam características semelhantes ao AU-RMC.

Palavras-chave: Landsat. Temperatura de Superfície. Correção Atmosférica. NDVI. Região Metropolitana de Curitiba. Aglomerado Urbano.

ABSTRACT

The land surface temperature is directly related to the characteristics of the materials that compose it and their interaction with the reflected and transmitted on different geometries that vary over time and space electromagnetic radiation. In this sense, the present study aims to analyze the thermal behavior of the surface of the Urban Agglomeration of the Metropolitan Region of Curitiba (AU-RMC) during the years 1985 to 2010, and aims to understand the relationship between the forms of urban occupation and surface temperature (TS) in different conditions of heat stroke , which can be detected by remote sensing. To meet this goal, we employed in this study using images taken by the Landsat-5. The changes of surface coverage were detected by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in order to identify the intensity of plant cover and by contrast the areas without this. TS was obtained from the band 6 (thermal infrared) based on the inverse of Planck's Law. For interpretation of the TS data available from meteorological stations Curitiba and Pinhais/ PR were employed. During the years 1985-2010, there was a reduction of vegetation and significant increase in TS for these areas. In the seasonal context, the results reveal two thermal patterns to the surface of AU- RMC, with a larger thermal amplitude between the surfaces for days on the spring / summer and a smaller amplitude to the days of fall / winter. In particular, it was observed that the more densely populated areas represent the highest horizontally TS, forming surface islands of heat (ICS) more intense in relation to the surrounding. The vegetated areas acted as islands of freshness surface (IFS). To evaluate the removal of the effects caused by the atmosphere compared the method adopted in this study with a method with atmospheric correction for the day 19/11/2010. Overall, the results provide information for a better understanding of urban climate of cities that have similar characteristics to the AU-RMC.

Palavras-chave: Landsat. Surface Temperature. Atmospheric Correction. NDVI. Metropolitan Region of Curitiba. Urban Agglomeration.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	27
FIGURA 2 - EMITÂNCIA RADIOATIVA DO CORPO NEGRO EM DIFERENTES TEMPERATURAS ..	29
FIGURA 3 - FATORES DA PAISAGEM QUE MODIFICAM A ASSINATURA ESPECTRAL DA SUPERFÍCIE TERRESTRE	30
FIGURA 4 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA, SOLO E VEGETAÇÃO	34
FIGURA 5 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO CONCRETO E ASFALTO	36
FIGURA 6 - EMISSIVIDADE E EMITÂNCIA DE DIFERENTES CORPOS	43
FIGURA 7 - JANELAS ATMOSFÉRICAS E REGIÕES DE ABSORÇÃO	45
FIGURA 8 - COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE E DO AR DURANTE O DIA E A NOITE	63
FIGURA 9 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (AU-RMC).....	67
FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DA OCUPAÇÃO URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA (RMC).....	71
FIGURA 11 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA (RMC)	77
FIGURA 12 – SÍNTESE DO ROTEIRO METODOLÓGICO.....	84
FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE CARTOGRAFIA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO TÉRMICO	85
FIGURA 14 - EVOLUÇÃO DA COBERTURA DA SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA OS ANOS DE 1985, 2000 E 2010 A PARTIR DE IMAGENS TM/LANDSAT-5	102
FIGURA 15 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 06/05/1985.....	106
FIGURA 16 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 30/11/1985.....	110
FIGURA 17 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 15/07/1993.....	113
FIGURA 18 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 04/11/1993.....	115
FIGURA 19 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 31/05/2000.....	118
FIGURA 20 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 22/10/2000.....	121
FIGURA 21 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 01/08/2005.....	124
FIGURA 22 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 21/11/2005.....	126
FIGURA 23 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 31/08/2010.....	128

FIGURA 24 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 19/11/2010.....	130
FIGURA 25 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DOS DIAS REPRESENTATIVOS AOS PERÍODOS DE OUTONO/INVERNO PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000 E 2010	136
FIGURA 26 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DOS DIAS REPRESENTATIVOS AOS PERÍODOS DE PRIMAVERA/VERÃO PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000 E 2010.	137
FIGURA 27 - SÍNTESE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000 E 2010.....	138
FIGURA 28 - BAIRROS DE CURITIBA SELECIONADOS PARA A ANÁLISE EM DETALHE DA TS DO AU-RMC PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010	140
FIGURA 29 - COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO CAMPO COMPRIDO PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010	142
FIGURA 30 - COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO SÍTIO CERCADO PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010	145
FIGURA 31 – COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO JARDIM SOCIAL PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010	148
FIGURA 32 – COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO CENTRO PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010	150
FIGURA 33 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PELOS MSC E MCA PARA O DIA 19/11/2010.....	154
FIGURA 34 - DIFERENÇA DA TS OBTIDA PELOS MCA E MSC E SUA RELAÇÃO COM O NDVI PARA O DIA 19/11/2010.....	156

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA: POPULAÇÃO ABSOLUTA DOS MUNICÍPIOS (1970 A 2010)	73
TABELA 2 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 03/05/1985 A 06/05/1985.....	105
TABELA 3 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 27/11/1985 A 30/11/1985.....	109
TABELA 4 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 12/07/1993 A 15/07/1993.....	112
TABELA 5 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 01/11/1993 A 04/11/1993.....	114
TABELA 6 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 28/05/2000 A 31/05/2000.....	117
TABELA 7 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 19/10/2000 A 22/10/2000.....	120
TABELA 8 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 29/07/2005 A 01/08/2005.....	123
TABELA 9 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 18/11/2005 A 21/11/2005.....	125
TABELA 10 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 28/08/2010 A 31/08/2010.....	127
TABELA 11 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 16/11/2010 A 19/11/2010.....	129
TABELA 12 - MEDIÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE DURANTE OS PERÍODOS DE VERÃO E INVERNO DO ANO 2013	133
TABELA 13 – DADOS DE OCUPAÇÃO DOS BAIRROS DE CURITIBA	141
TABELA 14 – DIFERENÇA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA EM 19/11/2010 COM RELAÇÃO AOS INTERVALOS ANÁLOGOS PARA OS MÉTODOS COM CORREÇÃO E SEM CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	152
TABELA 15 – DIFERENÇA ESTATÍSTICA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PARA O DIA 19/11/2010 ENTRE OS MÉTODOS COM CORREÇÃO E SEM CORREÇÃO ATMOSFÉRICA..	152

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – SENSORES TÉRMICOS EM PLATAFORMAS ORBITAIS FONTE: INPE (2012).....	41
QUADRO 2 - APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL EM ESTUDOS DE CLIMA URBANO FONTE:	56
QUADRO 3 - BASE DE ARQUIVOS ESPACIAIS UTILIZADOS PARA O ESTUDO	80
QUADRO 4 - RELAÇÃO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5 UTILIZADAS FONTE: INPE (2012), ORGANIZADO PELO AUTOR	81
QUADRO 5 - COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA PARA OS SENSORES TM/LANDSAT-5 FONTE:	88
QUADRO 6 - CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO PARA OS SENSORES TÉRMICOS DAS SÉRIES LANDSAT TM E ETM	90

LISTA DE SIGLAS

AFGL	- Air Force Geophysics Laboratory
AU-RMC	- Aglomerado Urbano da Região Metropolitana de Curitiba
COMEC	- Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba
DN	- Digital Number
DOS	- Dark Object Substration
IAPAR	- Instituto Agrônômico do Paraná
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICS	- Ilha de Calor de Superfície
IFS	- Ilha de Frescor de Superfície
IFOV	- Instantaneous Field Of View
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPARDES	- Instituto Paranaense de Pesquisa e Desenvolvimento Econômico e Social
IPEA	- Instituto de Pesquisa Aplicada
IPPUC	- Instituto de Pesquisa e Planejamento de Curitiba
ITCG	- Instituto de Terras e Cartografia
LANDSAT	- Land Remote Sensing Satellite
LOWTRAN	- LOW Atmospheric Radiance and TRANsmittance
MPa	- Massa Polar Atlântica
MTa	- Massa Tropical Atlântica
MTc	- Massa Tropical Continental
MCA	- Método Com Correção Atmosférica
MSC	- Método Sem Correção Atmosférica
METRIC	- Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized Calibration
MODTRAN	- MODerate resolution atmospheric TRANsmission);
NDVI	- Normalized Difference Vegetation Index
PDI	- Plano de Desenvolvimento Integrado
REM	- Radiação Eletromagnética
RGB	- Red x Green x Blue (Composição de bandas)

RMC	- Região Metropolitana de Curitiba
SEBAL	- Surface Energy Balance Algorithms for Land
SIMEPAR	- Sistema Meteorológico do Paraná
TA	- Temperatura do ar
TB	- Temperatura de Brilho
TM	- Thematic Mapper
TS	- Temperatura de superfície
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
USGS	- U.S. Geological Survey
UTM	- Universal Transversa de Mercator
WGS84	- World Geodetic System of 1984
5S	- Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum
6SV1	- Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum, V1

LISTA DE SIMBOLOS

- $\overline{\omega}$ - Energia radiante total emitida pelo corpo ($W.m^{-2}$)
- \mathcal{E} - Emissividade
- σ - Constante de Stefan-Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)
- T - Temperatura absoluta do corpo (Kelvin)
- T_b - Temperatura de brilho
- Mr - Corpo real
- Mb - Corpo negro
- C_2 - Constante física determinada experimentalmente
- λ - Comprimento de onda
- B_λ - Radiância espectral em unidades de $W/(m^2.sr.\mu m)$
- C_1 - Constante física determinada experimentalmente
- L_λ - Radiância em unidade $W/(m^2.sr.\mu m)$
- $G_{rescale}$ - Fator de ganho de redimensionamento da banda em $(W/m^2.sr.\mu m) / DN$
- Q_{cal} - Valor do pixel (número digital)
- $B_{rescale}$ - Perda de redimensionamento da banda em $W/(m^2.sr.\mu m)$
- ρ_λ - TOA Reflectância Planetária (sem unidade)
- π - Constante matemática igual a ~ 3.14159 (sem unidade)
- L_λ - Radiância em unidade em $W/(m^2.sr.\mu m)$
- d - Distância da Terra-Sol, em unidades astronômicas
- $ESUN_\lambda$ - irradiância Solar em $W/(m^2.\mu m)$
- θ - Elevação do Sol em graus
- $K2$ - Constante de calibração de pré-lançamento (Kelvin)
- $K1$ - Constante de calibração de pré-lançamento em $W/(m^2.sr.\mu m)$
- L_λ - Radiância em unidade em $W/(m^2.sr.\mu m)$
- T_s - Temperatura da superfície
- λ_6 - Comprimento de onda médio da radiância da banda 6 (11,435 μm)
- h - Constante de Planck (6.28×10^{-34} J/seg)

- c - Velocidade da luz (2.998×10^8 m/seg)
- a - hc/σ (1.438×10^{-2} mK)
- $NDVI$ - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
- ρ_4 - Radiância do infravermelho próximo (banda 4 do TM/Landsat-5)
- ρ_3 - Radiância do vermelho (banda 3 do TM/Landsat-5)
- \ln - Logaritmo natural
- CV_{R2} - Radiância com correção atmosférica
- CV_{R1} - Valor da radiância do sensor térmico Landsat-5
- $L \uparrow$ - Radiação emitida pela superfície
- $L \downarrow$ - Radiação em ondas longas que atinge a superfície
- τ - Transmissividade da atmosfera (sem unidade)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
1. INTRODUÇÃO	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. O SENSORIAMENTO REMOTO	25
2.1.1. Princípios Físicos do sensoriamento remoto	26
2.1.2. Análise espectral de alvos de superfície	33
2.2. O INFRAVERMELHO TERMAL	37
2.2.1. Princípios físicos do infravermelho termal	38
2.2.2. Sensores do infravermelho termal.....	40
2.3. A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	47
2.3.1. A temperatura de superfície aplicada ao estudo de ilhas de calor	51
2.3.2. Principais aplicações do sensoriamento remoto para o estudo da temperatura de superfície em ambiente urbano	51
2.3.3. Limitações para a estimativa da temperatura de superfície	59
2.3.4. Considerações a respeito da obtenção da Temperatura de Superfície a partir de técnicas de sensoriamento remoto.....	64
3. O AGLOMERADO URBANO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA	66
3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DO AU-RMC.....	67
3.2. A CIDADE DE CURITIBA E A FORMAÇÃO DO AU-RMC.....	70
4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	80
4.1. MATERIAIS.....	80
4.1.1. Bases Cartográficas.....	80
4.1.2. Imagens Orbitais	81
4.1.3. Equipamentos e Softwares	81
4.1.4. Dados das Estações Meteorológicas de Curitiba e Pinhais	82
4.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	83
4.2.1. Processamento Digital e Cartografia (BLOCO 1).....	85
4.2.1.1. Procedimento para seleção das imagens de satélite Landsat-5	85
4.2.1.2. Procedimento de correção geométrica	86

4.2.1.3. Procedimento de calibração radiométrica	89
4.2.1.4. Procedimento para correção do Albedo Planetário	88
4.2.1.5. Procedimento para obtenção da Temperatura de Brilho	89
4.2.1.6. Procedimento para obtenção da Temperatura de Superfície	90
4.2.1.7. Geração do NDVI	92
4.2.1.8. Aplicação da Correção Atmosférica para o dia 19/11/2010.....	94
4.2.2. Coleta de Campo (BLOCO 2)	97
4.2.3. Dados Meteorológicos (BLOCO 3)	98
4.2.4. Considerações a respeito da organização dos dados	99
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	101
5.1. CENÁRIOS DA TS PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000, 2005 E 2010	105
5.1.1. Cenário 1 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da TS para o ano de 1985.....	105
5.1.2. Cenário 2 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da temperatura de superfície para o ano de 1993.....	112
5.1.3. Cenário 3 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da temperatura de superfície para o ano de 2000.....	117
5.1.4. Cenário 4 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da Temperatura de Superfície para o ano de 2005.....	123
5.1.5. Cenário 5 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da temperatura de superfície para o ano de 2010.....	127
5.2. ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000, 2005 E 2010.....	131
5.3. ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010	134
5.3.1. Análise do bairro Campo Comprido (Baixo Adensamento)	141
5.3.2. Análise do bairro Sítio Cercado (Alto Adensamento)	144
5.3.3. Análise do bairro Jardim Social (Médio Adensamento)	147
5.3.4. Análise do bairro Centro (Adensamento Vertical)	149
5.4. AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA NA IMAGEM TERMAL DO SENSOR TM/LANDSAT-5 PARA O DIA 19/11/2010	152
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	158
7. REFERÊNCIAS.....	162

1. INTRODUÇÃO

As aglomerações urbanas que marcam a superfície do planeta, quando observadas por imagens provenientes de satélites orbitais, despertam reflexões sobre o recente impacto do processo da urbanização.

Segundo Mendonça (2004), o século XX foi marcado por vários estudiosos como sendo o “século da urbanização”, enquanto que o século XIX seria o “século da cidade”. Esta concepção está motivada na perspectiva do predomínio da população mundial em aglomerações urbanas até o ano de 2025.

Quando recorre-se à literatura histórica científica brasileira, principalmente no que diz respeito ao processo de formação e ocupação das grandes cidades brasileiras é comum encontrar referências que denotam um crescimento acelerado e desordenado. Esta constatação é fundamentada no rápido processo de internacionalização da economia brasileira, no desenvolvimento da agricultura mecanizada, no aumento do consumo e da expansão industrial a partir de meados da década de 1970.

Embora este período apresente certo avanço econômico para o país, por outro lado comprometeu as gerações futuras com uma série de problemas sociais, econômicos, estruturais e ambientais. (LOMBARDO, 1985; ULTRAMARI e MOURA, 1994; MENDONÇA, 2001, 2004; VILLAÇA, 2001).

Sobre este cenário, Santos (1993) observou a existência de uma “urbanização corporativa” na formação das cidades brasileiras. Para este autor, os espaços vazios, sobretudo das grandes cidades, condicionaram o surgimento de diversas especulações imobiliárias, repercutindo assim na ocupação das periferias dos grandes centros urbanos por classes sociais menos favorecidas, áreas segregadas, bem como, pelo surgimento de localidades mais privilegiadas, ou seja, áreas mais valorizadas que atendiam o interesse de um capitalismo competitivo.

Na opinião de Dumke (2007), como uma das poucas exceções, a cidade de Curitiba/PR contou com um processo permanente e institucionalizado de planejamento urbano desde 1943 com o Plano Agache, posteriormente em 1964 com o Plano Serete e suas adaptações, em 2000 com a nova legislação

do Zoneamento de Uso e Ocupação do Solo e último Plano Diretor de 2004 adequado pela Lei Federal nº 10.257/01.

Para Pilotto (2010) a cidade de Curitiba se destaca como objeto de estudo no campo do planejamento urbano, e desta forma é tomada como referência para inúmeras pesquisas, projetos e estudos.

Dentro de uma abordagem de planejamento e discussão ambiental que engloba a cidade de Curitiba destacam-se as pesquisas desenvolvidas por Danni-Oliveira (1999), Mendonça (2004, 2005), Lima (2005), Dumke (2007), Leal (2012), entre outros.

Embora a cidade de Curitiba seja conhecida internacionalmente como “capital ecológica” apontado por Mendonça (2001) e Dumke (2007), ainda assim, estes autores consideram que a cidade apresenta uma série de problemas estruturais e ambientais. Alguns destes problemas estão relacionados ao eficiente *citymarketing* municipal e pela vinda de empresas durante as últimas três décadas que induziu um crescimento acelerado da cidade e região as quais não contavam com uma estrutura apropriada para alocar o intenso movimento migratório.

Apesar da interferência do Estado, os modelos de planejamento urbano realizados até então, mostraram-se limitados em relação aos inúmeros problemas socioambientais ocasionados pelo crescimento acelerado da população, como a ocupação das áreas de mananciais destinadas ao abastecimento público, poluição dos cursos d’água, ocupações de áreas irregulares, e o intenso processo de impermeabilização do solo e verticalização de edificações que promoveram alterações bioclimáticas locais e regionais (LIMA, 2000; DANNI-OLIVEIRA, 1999; DUMKE, 2007).

Estes efeitos podem ser observados no trabalho de Vieira (2006) que ao analisar a dinâmica da cobertura vegetal da cidade de Curitiba entre os anos de 1986 e 2004 por imagens orbitais constatou a supressão da vegetação em todas as regiões administrativas da cidade durante o período analisado.

Atrelado à redução das áreas verdes da cidade de Curitiba, Danni-Oliveira (1999) observou que a maior densidade de edificações e de sua verticalização contribuiu para redução da dispersão de poluentes, interferindo

desta forma nos regimes locais de precipitação e conforto térmico, configurando assim novos microclimas.

As principais modificações agravadas pelo processo de urbanização nas grandes cidades brasileiras, sintetizadas em Monteiro e Mendonça (2003); Mendonça (2004); Guerra e Cunha (2005) estão relacionadas principalmente a alteração das propriedades físicas e químicas dos materiais que constituem o sítio urbano, ou seja, as modificações estruturais da superfície, do ciclo hidrológico e do agravamento dos processos aerodinâmicos.

Estas modificações, que definem variados arranjos para o ambiente urbano para uma mesma cidade, podem ocasionar diferentes variações termo-higrométricas¹ conforme as características/quantidade de edificações e de vegetação as quais podem ser observadas nos estudos de Dumke (2007) e Leal (2012) para a cidade de Curitiba.

Deste modo, as interações existentes entre a dinâmica da superfície terrestre com processos atmosféricos revelam que o comportamento térmico de determinado local nada mais é do que o reflexo da intensidade, extensão e duração destas inter-relações, estando a elas condicionado a troca de energia entre os meios. Assim, para o entendimento do dimensionamento destas trocas energéticas se faz necessário o uso de abordagens de análise e mensurações compatíveis com a escala de observação, relativos aos fins almejados.

Com base nesta afirmação, para a análise do comportamento térmico de grandes aglomerações urbanas, se faz necessário o emprego de técnicas de sensoriamento remoto que podem subsidiar o estudo considerando a distribuição espacial do fenômeno em suas diferentes escalas.

Para Florenzano (2007) o uso de imagens de sensores orbitais aliado às técnicas de geoprocessamento, nos possibilita trabalhar simultaneamente com variáveis espaciais e temporais, o que potencializa os estudos regionais, auxiliando na identificação de diferentes fenômenos espaciais, como grandes desmatamentos, monitoramento de culturas e até mesmo o crescimento urbano de cidades em diferentes escalas de tempo.

Por meio destas imagens orbitais, a partir de técnicas de processamento digital de imagens, também é possível estimar a energia térmica produzida pela

¹ **Termo-higrométricas** refere à quantidade de umidade e a medida de temperatura do ar de um local.

superfície urbana com base na conversão da energia radiante emitida pela superfície terrestre que pode ser captada por imagens da faixa do infravermelho térmico (LOMBARDO, 1985; MENDONÇA, 1994; WENG, 2009).

Como exemplo, Mendonça e Dubreuil (2005) e Dumke (2007), observaram em suas pesquisas durante o mês de setembro de 2002, a partir de imagem do canal infravermelho termal da série *Landsat* e dados meteorológicos, a formação de um arquipélago de ilhas de calor e frescor na área urbana da Região Metropolitana de Curitiba (RMC). Para estes autores a existência destas ilhas está relacionada às diferentes coberturas do solo (construída ou vegetal) e sua respectiva densidade, bem como pela topografia, além das condições meteorológicas no momento da passagem do sensor.

Desta maneira, a motivação deste trabalho fundamenta-se na análise da distribuição e do comportamento da temperatura de superfície urbana numa perspectiva temporal, procurando desta maneira fornecer informações relevantes sobre o perfil térmico da superfície urbana da RMC a luz da seguinte pergunta: qual a relação entre o crescimento urbano da RMC e o aumento da temperatura da superfície a partir da década de 1980?

Assim, uma vez compreendida esta interação entre o crescimento e armazenamento de calor pela superfície urbana em uma série histórica pode confirmar o aumento da temperatura desta e retroalimentar desta maneira estudos aplicados ao clima urbano, fornecendo subsídios para decisões de urbanistas e de gestores municipais para o planejamento urbano de cidades.

Diante do exposto este estudo tem como objetivo analisar o comportamento térmico da superfície do Aglomerado da Região Metropolitana de Curitiba (AU-RMC), utilizando as imagens do sensor térmico *Thematic Mapper-TM* da série *Landsat-5*, durante os anos de 1985 a 2010, bem como compreender a relação entre as formas de ocupação urbana e sua temperatura de superfície (TS) produzida em diferentes condições de insolação.

Com base na premissa das modificações da cobertura da superfície do AU-RMC e da distribuição espacial de diferentes valores de TS durante os anos de 1985 e 2010, os objetivos específicos delimitados foram:

- a) Avaliar as formas de ocorrência e a distribuição espacial da TS entre as estações de outono/inverno e primavera/verão para os anos de 1985, 1993, 2000, 2005 e 2010 no AU-RMC.
- b) Comparar a cobertura da superfície do AU-RMC com TS adquirida.
- c) Avaliar a utilização do sensor termal TM/Landsat-5 para caracterização do ambiente térmico da AU-RMC, buscando correlacioná-lo com a temperatura do ar (TA).
- d) Analisar em detalhe amostras pontuais da cobertura da superfície e sua TS produzida em estações do ano diferentes.
- e) Aplicar um algoritmo de correção atmosférica para obtenção da TS e comparar seus resultados com um método sem correção.

Ressalta-se que a contribuição dessa pesquisa é propiciar uma melhor compreensão do campo térmico da superfície urbana em um momento que se discute os efeitos causados por uma mudança climática global que pode estar sendo agravada pelo calor produzido pelas grandes aglomerações urbanas.

Neste sentido, buscou-se neste trabalho por uma revisão de literatura que contemplasse um referencial teórico para obtenção da TS em áreas urbanas e os efeitos causados pelo balanço energético entre a superfície e atmosfera, bem como por sua estrita relação com a cobertura da superfície vegetada e não vegetada, as quais podem ser obtidas com técnicas de processamento digital a partir das imagens orbitais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise térmica da superfície e sua evolução exigem não apenas a aplicação de um método de conversão de valores digitais de um sensor térmico em valores de temperatura de superfície, e sim o entendimento dos princípios físicos que envolvem a extração destas informações e como estão distribuídas no espaço.

Além disso, estas técnicas possuem limitações que devem ser exploradas conforme a disponibilidade de informações da superfície e demais sensores que podem auxiliar na interpretação dos dados gerados.

Outro fator importante que valida o uso destas técnicas de sensoriamento remoto é a compreensão dos fenômenos atmosféricos atuantes no momento da aquisição da imagem térmica. Desta maneira, a presente revisão teórica foi dividida em três subcapítulos, que estão organizados da seguinte forma:

O primeiro subcapítulo visa discutir os princípios fundamentais do sensoriamento remoto, suas limitações e aplicações.

O segundo subcapítulo apresenta o desdobramento dos dois primeiros subcapítulos, destacando principalmente os princípios que envolvem o infravermelho termal que é a componente chave para a extração das informações térmicas da superfície terrestre.

Por fim, o terceiro subcapítulo discorre sobre as principais contribuições científicas a respeito da obtenção da temperatura de superfície terrestre por meio de técnicas de sensoriamento remoto e seus desdobramentos com foco especial no estudo urbano.

2.1. O SENSORIAMENTO REMOTO

Novo (2009) define sensoriamento remoto como:

“A utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as suas substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações” (NOVO, 2009, p.4).

De um modo geral, o sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de técnicas que permite obter informações da superfície da Terra, sem que haja contato físico com a mesma (JENSEN, 2011; ROSA, 2009).

Neste sentido, diversos satélites estão em órbita no espaço com o intuito de obter as mais variadas informações sobre o sistema Terra-atmosfera. Estes satélites registram em seus sensores os sinais emergentes no topo da atmosfera e os armazenam em forma de números digitais (ND), que são convertidos em radiância através de processos de calibração radiométrica.

De acordo com Jensen (2011), o sensoriamento remoto possibilita a obtenção de imagens sequenciais da mesma área do globo, o que permite acompanhar as modificações das superfícies urbanas e rurais, o monitoramento de queimadas e desflorestamentos que afetam o balanço de energia entre superfície e atmosfera, além, da detecção de tempestades severas e do acompanhamento das movimentações das nuvens e de sistemas frontais em tempo real por sistemas meteorológicos.

No Brasil, na visão de Rosa (2009), o sensoriamento remoto tomou impulso a partir da década de 1960 com o Projeto RADAMBRASIL, o qual tinha como principal objetivo a realização de um levantamento integrado dos recursos naturais do território brasileiro.

2.1.1. Princípios Físicos do sensoriamento remoto

A obtenção de dados por sensoriamento remoto requer o uso de energia. A energia com a qual operam os sensores remotos pode ser proveniente de uma fonte natural, como a luz do Sol e o calor emitido pela superfície da Terra, ou pode ser de uma fonte artificial como, por exemplo, o uso de radares. Em ambas as formas, a energia empregada é a energia eletromagnética (NOVO, 2009).

A radiação eletromagnética (REM) é o meio pelo qual a informação é transferida do objeto para o sensor. Todos os materiais (naturais ou artificiais) da superfície da Terra, com temperatura superior a zero absoluto (zero Kelvin), podem emitir, refletir, transmitir ou absorver seletivamente a radiação eletromagnética (MOREIRA, 2007).

Do ponto de vista de Novo (2009), a REM pode ser definida como a forma dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com a matéria. Essa energia é medida em frequência (em unidades de hertz-Hz) e comprimento de onda (em unidades de metro). A frequência de onda é o número de vezes que uma onda se repete por unidade de tempo. O comprimento de onda é a distância entre dois picos de ondas sucessivas: quanto mais distantes, maior é o comprimento de onda.

Ao conjunto de ondas eletromagnéticas que compõem o campo de radiação de um determinado objeto dá-se o nome de espectro eletromagnético.

A FIGURA 1 ilustra todo o conjunto de comprimentos de onda conhecidos, que vão desde os raios gama até ondas de rádio.

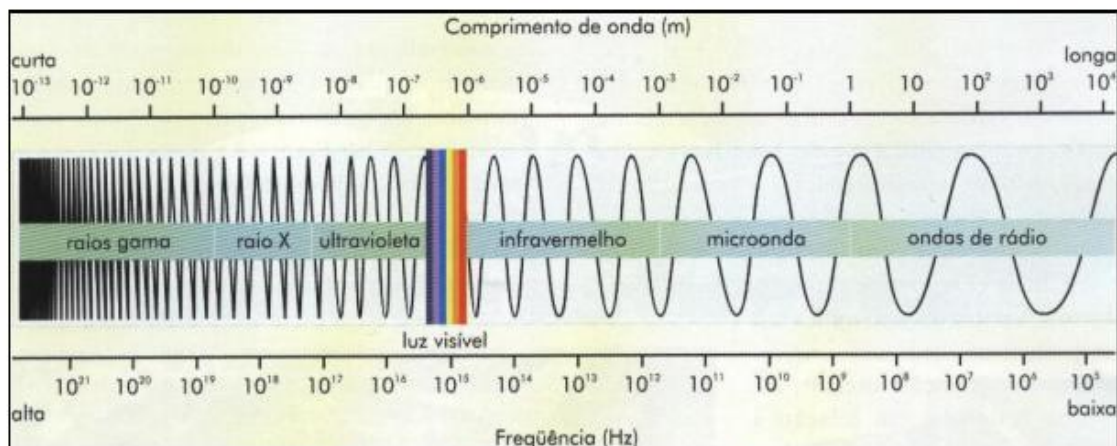


FIGURA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO
 FONTE: FLORENZANO (2007)

A energia eletromagnética (FIGURA 1) pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência. O espectro eletromagnético apresenta as subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico que dá origem a energia eletromagnética, do tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética.

De acordo com Jensen (2011), a capacidade da radiação numa banda espectral em realizar trabalho é denominada de energia radiante. Uma vez que a energia eletromagnética é gerada, ela é propagada através da atmosfera da Terra quase à velocidade da luz no vácuo. Ao contrário de um vácuo no qual nada acontece, porém, a atmosfera pode afetar não apenas a velocidade da radiação como também o seu comprimento de onda, sua intensidade e a sua distribuição espectral.

Dentre os parâmetros atmosféricos que interferem no comportamento da REM temos: a presença de aerossóis, umidade atmosférica, turbulência (espessura óptica), etc. Neste sentido, a radiação eletromagnética pode ser desviada de sua direção original quando ela encontra substâncias de diferentes densidades, como ar e água. Esse processo é conhecido como refração (NOVO, 2009).

Outro efeito provocado pela atmosfera é o espalhamento da radiação pelas partículas atmosféricas. O espalhamento difere da refração no sentido

que a direção associada ao espalhamento é imprevisível, enquanto a direção de refração é previsível (JENSEN, 2011).

De modo geral, pode-se dizer que o aumento da concentração de aerossóis na atmosfera provoca um aumento no espalhamento. O aumento da umidade relativa também favorece a manutenção de partículas sólidas em suspensão na atmosfera, alterando as características de espalhamento (NOVO, 2009).

O efeito de absorção da energia radiante ocorre tanto na atmosfera quanto no terreno. A absorção é o processo pelo qual a energia radiante incidente é absorvida e convertida para outras formas de energia (JENSEN, 2011).

A radiação eletromagnética se origina a partir da transformação de outras formas de energia, tais como energia cinética, química, térmica ou nuclear. A origem da radiação eletromagnética varia ao longo do espectro eletromagnético. Para o sensoriamento remoto da superfície terrestre a principal fonte da radiação é Sol (MOREIRA, 2007).

Outra fonte importante de radiação eletromagnética é a própria Terra, cujo espectro de emissão pode ser modelado por um corpo negro à temperatura de 300 K. O corpo negro é um modelo físico que permite modelar a energia emitida por uma fonte a uma taxa máxima por unidade de área e por comprimento de onda, a uma dada temperatura. Um corpo negro, teoricamente, absorve toda a energia que nele incide, e também emite toda a energia absorvida.

A partir do modelo proposto por Planck, pode-se derivar os seguintes fatos sobre o comportamento do corpo negro:

- 1) A radiação total de um corpo negro é função apenas da temperatura;
- 2) Para uma dada região do espectro, quanto maior a temperatura, maior a quantidade de energia emitida pelo corpo negro;
- 3) A energia emitida por um corpo negro com uma mesma temperatura não é a mesma para todos os comprimentos de onda;
- 4) O comprimento de onda no qual a energia emitida pelo corpo negro é máxima se desloca para regiões de alta frequência, na medida em que a temperatura do corpo aumenta (NOVO, 2009).

Pela observação da FIGURA 2 constata-se que a emissão total de um corpo negro aumenta com a sua temperatura, ou seja, a intensidade radiante do corpo negro com a temperatura de 6000 K é menor que aquela de um corpo com temperatura de 7000 K. O comprimento de onda de maior emissão do corpo se desloca para comprimentos de onda cada vez menores na medida em que aumenta a temperatura do corpo. A energia emitida por um corpo negro a uma dada temperatura não é a mesma em todos os comprimentos de onda.

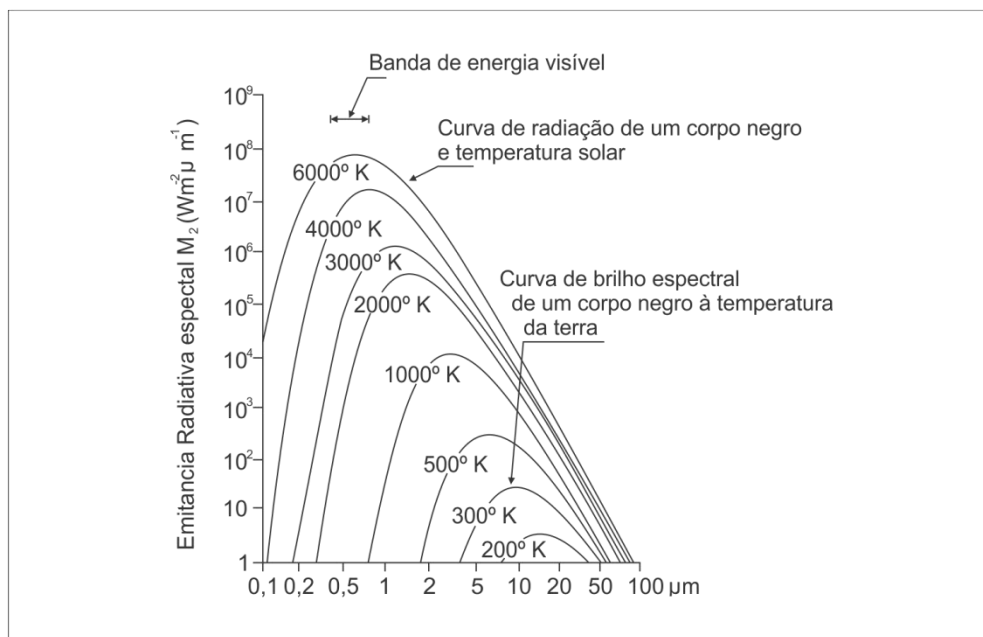


FIGURA 2 - EMITÂNCIA RADIOATIVA DO CORPO NEGRO EM DIFERENTES TEMPERATURAS
 FONTE: CHUVIECO (1990)

Nota: A temperatura da superfície do Sol é de aproximadamente 6000K e da superfície da Terra é de 300K; logo, o comprimento de onda corresponde à máxima emissão do Sol é de aproximadamente 0,5 μm , e para Terra, é de aproximadamente 10 μm .

O conceito de corpo negro é útil para se entender o espectro de emissão da Terra. A Terra pode ser considerada como um corpo negro com temperatura equivalente a 300 K. Com essa temperatura os comprimentos de onda de máxima emissão da Terra se encontram entre 8,0 e 12,0 μm , embora também haja radiação emitida na região do microondas.

As definições descritas sugerem que a energia radiante deve ser conservada, refletida de volta por reflexão, transmitida através do material, ou absorvida e transmitida em alguma outra forma de energia no interior dos

componentes do terreno. O efeito líquido da absorção de radiação pela maioria das substâncias é que a energia é convertida em calor, causando um subsequente aumento da temperatura da substância.

Os sistemas de sensoriamento remoto ficam posicionados num ponto do espaço durante apenas um ponto único no tempo, e geralmente observam uma pequena porção da Terra num certo instante (NOVO, 2009).

A FIGURA 3 ilustra os principais fatores que modificam a energia captada por um sensor remoto.

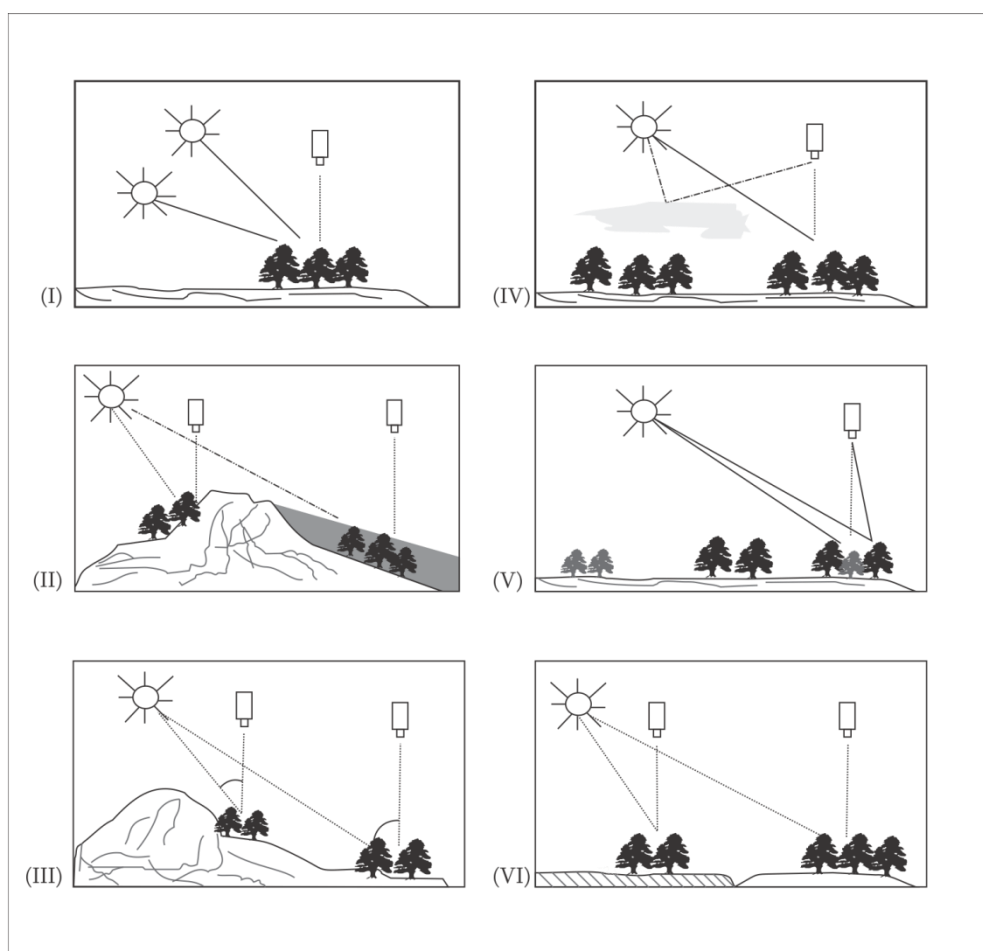


FIGURA 3 - FATORES DA PAISAGEM QUE MODIFICAM A ASSINATURA ESPECTRAL DA SUPERFÍCIE TERRESTRE
 FONTE: CHUVIECO (1990)

Legenda: (I) variações estacionais da altura solar; (II) orientação; (III) declividade; (IV) condições atmosféricas; (V) condição fenológica e (VI) substrato edáfico.

De acordo com Jensen (2011), outras energias radiantes provenientes de várias outras trajetórias, podem adentrar no campo de visada e introduzir ruído/confusão no processo de sensoriamento remoto.

Além dos fatores ilustrados na FIGURA 3, outro problema recorrente para obtenção das informações dos alvos é quando o fluxo radiante refletido ou emitido pela superfície da Terra entra novamente na atmosfera, onde interage com vários gases, vapor d'água e particulados. Assim, os efeitos de espalhamento, a absorção, a reflexão e a refração influenciam o fluxo radiante mais uma vez antes que a energia seja registrada pelo sistema de sensoriamento remoto (SOUZA, 2008).

Na visão de Souza (2008), para remoção dos efeitos causados pela trajetória do fluxo radiante é possível a aplicação de modelos de correção atmosférica. Estes modelos consistem na conversão de números digitais (ND) em parâmetros da superfície (temperatura e refletância) podendo assim eliminar os efeitos que a atmosfera causa no sinal do satélite.

Para tanto, as funções da correção atmosférica (transmitância e refletância), para estimar temperatura/refletância da superfície são determinadas em regiões espectrais e processos radiativos diferentes (absorção e emissão ou espalhamento) implicando em métodos específicos para cada situação.

Existem na literatura vários métodos alternativos para correção atmosférica, alguns desses métodos são comentados por Liang *et al.* (2001) e Song *et al.* (2001), como exemplo, o método de redução de contraste, e o método de subtração de Objetos Escuros ou DOS (Dark Object Subtration). Estes métodos são de simples aplicação, uma vez que usam apenas as informações da própria imagem, não dependendo de parâmetros atmosféricos ou de dados da superfície para determinar a contribuição da atmosfera em cada banda espectral. Uma de suas limitações consiste na exigência de alvos específicos nas imagens analisadas.

Outra solução alternativa para filtrar efeitos da atmosfera são os métodos empíricos, resultantes de simulações de códigos de transferência radiativa, como exemplo: a metodologia empregada no *Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized Calibration* (METRIC)

proposto por Tasumi *et al.* (2007) e no SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) por Bastiaanssen *et al.* (2000).

Em outros métodos a correção é feita a partir da identificação de objetos e o conhecimento de suas respectivas propriedades no momento da passagem do satélite. Essas informações são usadas para deduzir as propriedades dos objetos e de outras imagens.

De acordo com Souza (2008), ainda existe os “métodos físicos” que são fundamentados na teoria da transferência radiativa. Estes modelos são capazes de corrigir os efeitos atmosféricos retratando a complexidade da atmosfera. São os mais complexos, porém os mais exatos.

De qualquer forma, os métodos mais acurados estão fundamentados na teoria da transferência radiativa, em que as funções de correção atmosférica, cuja precisão depende da qualidade dos parâmetros ópticos (SONG *et al.*, 2001), são deduzidas a partir da equação de transferência radiativa.

Conforme Souza (2008) os códigos de transferência radiativa não realizam correções atmosféricas diretamente. Estes modelos realizam várias simulações das condições das camadas intermediárias da atmosfera e das propriedades da superfície, de modo que as funções de correção relacionam magnitudes da superfície com as intensidades de radiação registrada pelos sensores de um satélite através de uma regressão linear.

Para esta finalidade, de acordo com Souza (2008), os códigos de transferência radiativa mais populares são: LOWTRAN (*LOW Atmospheric Radiance and TRANsmittance*) que é um modelo de propagação da radiação de baixa resolução, desenvolvido por pesquisadores da Air Force Geophysics Laboratory (AFGL); MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) que cobre a faixa do espectro do ultravioleta da luz visível ao infravermelho distante ; 5S (*Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*) desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Óptica da Atmosfera de Lille (França) consiste nu modelo simples, que considera a atmosfera como uma única camada homogênea ; e o 6SV1 (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum, Vector, version 1*) que opera sob uma ampla gama de condições atmosféricas, espectrais e geométricas.

Os princípios comentados neste subcapítulo subsidiam o entendimento das interações que ocorrem entre a superfície e atmosfera, ou seja, as possibilidades e as restrições para obtenção de informações detalhadas da superfície terrestre e da atmosfera por técnicas de sensoriamento remoto.

2.1.2. Análise espectral de alvos de superfície

A extração das informações adquiridas por sensores remotos são feitas através da análise espectral dos alvos da superfície terrestre, tendo como base a radiação refletida ou emitida pelos mesmos. Consequentemente, para conhecer o comportamento espectral de um alvo é preciso levar em conta os parâmetros espectrais de propagação da radiação e sua refletância. (NOVO, 2009).

Assim, com base nos diferentes níveis espectrais coletados por um sensor pode-se verificar a quantidade de radiação refletida ou emitida pelos alvos. As características físicas, químicas ou biológicas, são próprias de cada alvo, o que determina seu comportamento espectral (SOUZA, 2008).

A refletância espectral constitui a principal informação para distinguir alvos mediante imagens de satélite. Os alvos mais sensíveis em relação à radiação refletida são: o solo, a água e a vegetação (MOREIRA, 2007), de forma que suas características espectrais constituem elementos fundamentais para a interpretação de dados de sensoriamento remoto. Esses três tipos de alvo apresentam comportamentos espectrais totalmente diferentes entre si, conforme mostrado na FIGURA 4.

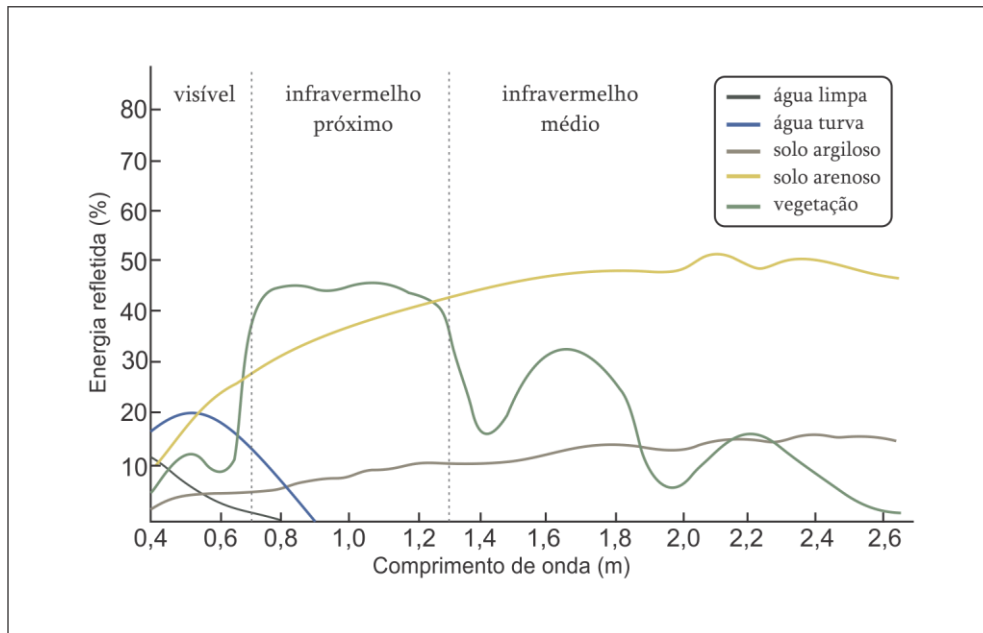


FIGURA 4 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA, SOLO E VEGETAÇÃO
 FONTE: FLORENZANO (2007)

De acordo com Moreira (2007), o comportamento espectral da água pode ser influenciado pela presença de materiais dissolvidos ou em suspensão contidos no seu volume. Outro fator seria a presença de matéria orgânica dissolvida que desloca o máximo da refletância para a faixa do verde-amarelo, enquanto que a matéria inorgânica em suspensão desloca o máximo da refletância espectral na direção do vermelho. A refletância espectral de uma superfície de água pode, ainda, ser alterada pela rugosidade da superfície, em que quanto maior for o fator de rugosidade maior a intensidade de refletância difusa.

Moreira (2007) afirma que são vários os fatores que podem influenciar o sinal da radiância referente a uma superfície vegetada. Nota-se que a vegetação pode ser entendida como um conjunto de plantas que ocupa uma determinada área geográfica. Pela FIGURA 4 observar-se que a curva espectral da vegetação apresenta um comportamento bastante diferente nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Na região do visível a refletância é relativamente baixa, devido à absorção da radiação por elementos fotossintéticos.

Já na região entre 0,4 e 0,6 μm (região entre o azul e o vermelho), a clorofila absorve fortemente a radiação incidente, desta maneira, com a

redução da intensidade de clorofila, a refletância do vermelho aumenta e a vegetação se torna amarela.

Segundo Novo (2009), deve ser observado o comportamento espectral da vegetação com relação ao seu ciclo vegetativo.

Na região do infravermelho próximo (0,7 – 1,1) μm , a refletância dos vegetais é bastante significativa apresentando valores máximos ao passo que a absorção tem valores baixos. Quando uma planta sofre qualquer estresse, a curva espectral da refletância sofre algumas alterações ao longo do espectro eletromagnético.

Para Moreira e Shimabukuro (2004), o estudo mais detalhado das características de um determinado alvo deve conter informações sobre o seu comportamento espectral representado por uma curva espectral e informações sobre: condições climáticas, horário de medições, instrumentos e condições experimentais.

Com relação ao comportamento espectral do solo, este pode ser influenciado por alguns fatores como: umidade, matéria orgânica, minerais, rugosidade da superfície dentre outros. Sendo assim, os efeitos de cada um destes fatores resultam em um diferente comportamento espectral para o solo. Por exemplo; ao aumentar a umidade do solo, nele aumenta-se a absorção da radiação através da presença da água (líquida) que absorve nas bandas acima de 0,7 μm e conseqüentemente a refletância espectral do solo diminui. A refletância é a relação entre o fluxo refletido pelo incidente.

Ainda considerando o comportamento de alvos, nas áreas urbanas, que é foco deste trabalho, apresentam grande diversidade de uso, principalmente de material construtivo como concreto e asfalto. A refletância destes dois alvos pode ser observada na FIGURA 5.

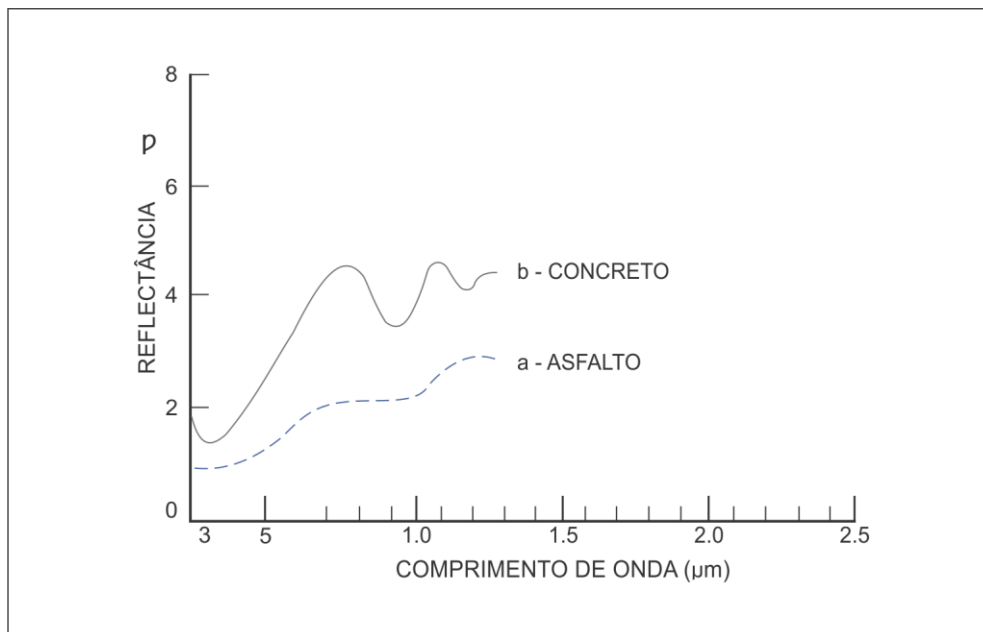


FIGURA 5 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO CONCRETO E ASFALTO
 FONTE: NOVO (2009)

Observa-se pela FIGURA 5, que a linha do comportamento espectral do concreto (linha b) é mais sinuosa que o asfalto (linha a). Este fato está relacionado à maior absorção da reflectância do concreto entre as faixas de 0,3 a 0,6 μm e 0,8 a 1,1 μm.

Analisar o comportamento espectral das FIGURAS 5 e 6 de forma individualizada parece ser uma tarefa fácil. Porém, devesse somar à análise a complexidade da interferência de objetos circunvizinhos apontados na FIGURA 3 p.26, considerando que estes alvos não se encontram necessariamente em uma superfície plana e uniformemente iluminada (comportamento lambertiano), além do desgaste natural destes alvos ao longo do tempo.

2.2. O INFRAVERMELHO TERMAL

Como visto no capítulo anterior, o espectro eletromagnético é dividido em regiões em função dos processos físicos e comprimento de onda. A porção do espectro eletromagnético de 3,0 a 20 μm é proveniente basicamente da emissão de energia da superfície, ou seja, das vibrações moleculares decorrentes da temperatura dos corpos.

De acordo com Jensen (2011), o estudo desta porção do espectro, importante desenvolvimento tecnológico do infravermelho ocorreu durante o período que compreende as duas Grandes Guerras Mundiais no início do século XX.

Entre 1950 e 1960, o governo dos Estados Unidos (EUA) permitiu o uso desses sensores (restritos ao uso militar) para alguns seletos clientes civis. Em 1968, o governo dos EUA abriu para o meio civil a produção de sistemas de sensoriamento remoto no infravermelho termal que não excedessem a certa resolução espacial e sensibilidade térmica (JENSEN, 2011).

O primeiro dado de um sensor remoto (liberado para uso civil) e a bordo de um satélite foi coletado pelo U.S. *Television IR Operational Satellite* (TIROS), lançado em 1960. Os dados de infravermelho termal de resolução grosseira foram ideais para o monitoramento de padrões regionais de nuvens e movimentos de frentes.

Segundo Voogt e Oke (2003), o uso desta porção da REM que pode ser captada por sensores térmicos orbitais e aerotransportados tem sido empregada recentemente para obtenção da TS, principalmente para análise de ilhas de calor em ambiente urbano.

2.2.1. Princípios físicos do infravermelho termal

Segundo Moreira (2007) existe na termodinâmica o seguinte postulado: “Todo corpo com temperatura acima de zeros graus Kelvin (K), ou seja, -273°C , absorve e/ou emite energia eletromagnética.” Portanto, a quantidade de energia absorvida e/ou emitida é função direta da temperatura do corpo.

Dentro deste contexto, todos os objetos do mundo real com temperatura absoluta acima de zero absoluto (0k ; $-273,16^{\circ}\text{C}$, $-459,69\text{ F}$) apresentam movimento aleatório que é resultado da energia das partículas da matéria molecular, conhecida como calor cinético, calor interno, real ou verdadeiro. Quando essas partículas colidem, elas mudam seu estado de energia e emitem radiação eletromagnética. Este movimento aleatório das partículas também pode ser transferido de um local para outro por condução e convecção (NOVO, 2009; JENSEN, 2011).

A radiação eletromagnética emitida por um objeto é chamada de fluxo radiante (ϕ) e é medido em Watts. A concentração da quantidade de fluxo radiante emitida por um objeto é sua temperatura radiante (T_{rad}).

Segundo Jensen (2011), para a maioria dos objetos do mundo real (exceto aqueles compostos por vidro e metal), existe uma alta correlação positiva entre a temperatura cinética verdadeira do objeto e a quantidade de fluxo radiante radiado pelo objeto.

Todas as feições que são encontradas na paisagem, como vegetação, solo, rocha, água e pessoas, emitem radiação eletromagnética infravermelha termal na porção de $3,0 - 14\ \mu\text{m}$ do espectro. Entretanto, a visão humana não consegue detectar diferenças sutis em energia infravermelha termal vinda de objetos do mundo real porque são sensíveis primariamente aos comprimentos de onda curtos da luz visível $0,4 - 0,7\ \mu\text{m}$ (JENSEN, 2011)

Conforme Novo (2009) a radiação eletromagnética emitida pelos objetos é função basicamente da temperatura do corpo e de sua emissividade. A relação entre a temperatura do corpo (T), sua emissividade (\mathcal{E}) e a quantidade total de energia radiante emitida por um corpo ($\overline{\mathcal{W}}$) pode ser expressa pela Equação (1):

$$\bar{\omega} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (W.m}^{-2}\text{)} \quad (1)$$

Onde:

$\bar{\omega}$ = energia radiante total emitida pelo corpo (W.m⁻²);

ε = emissividade;

σ = Constante de Stefan-Boltzmann (1.38x10⁻²³ J/K);

T = Temperatura absoluta do corpo (K);

A partir da Equação (2) pode-se deduzir que para um corpo formado por um dado material, a energia radiante só depende de sua temperatura. Assim sendo, quanto maior for a sua energia radiante detectada pelo sensor, maior será sua temperatura.

A emissividade (ε) é a razão entre a radiância real emitida por um corpo do mundo real (M_r) radiando seletivamente e um corpo negro (M_b) à mesma temperatura termodinâmica (cinética), dada por:

$$\varepsilon = M_r/M_b \quad (2)$$

Onde:

M_r = Corpo real

M_b = Corpo negro

Todos os corpos que radiam seletivamente têm emissividades variando de 0 a 1, de acordo com as características de cada objeto.

Conforme Novo (2009), a radiação termal emitida por um objeto da superfície se origina nos primeiros milímetros mais superficiais. Isto significa que a emissividade depende muito do estado da superfície ou de sua cobertura. Como exemplo, a presença de uma fina camada de água no solo poderá mudar drasticamente sua emissividade. Esta mesma autora alerta que se deve tomar bastante cuidado ao se tentar deduzir a emissividade de um

material a partir de sua aparência visual, ou de sua refletância na região do visível, sendo a neve um bom exemplo dos equívocos que podem resultar ao se analisar a refletividade do visível.

Diferentemente da região do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio que estão contidas na faixa do espectro refletivo (0,3 μm a 4,0 μm), para o sensoriamento remoto a região do infravermelho termal é utilizada para captar a emissão de radiação eletromagnética dos alvos da superfície terrestre (ROSA, 2009).

2.2.2. Sensores do infravermelho termal

Para o imageamento da superfície terrestre, os sensores termais acoplados em plataformas aerotransportáveis, bem como em plataformas orbitais possuem componentes semelhantes àqueles que operam no visível e no infravermelho próximo. A diferença fundamental é que o sinal a ser detectado é relativamente mais fraco para essa região do espectro, e os detectores de radiação termal disponíveis são menos sensíveis do que os detectores de radiação no visível e infravermelho próximo (NOVO, 2009).

Segundo Novo (2009) os detectores utilizados em sensores termais são construídos com telureto de mercúrio e cádmio (HgCdTe), os quais se comportam como fotocondutores em resposta aos fótons incidentes na faixa da radiação termal. Outro detector também utilizado em sensores termais é o composto de germânio-mercúrio (*Mercury-doped germanium* – (Ge(Hg))).

Alguns sensores ópticos que operam na região do visível e infravermelho próximo também possuem canais específicos para a aquisição de dados termais. Os principais sensores termais são apresentados no QUADRO 1.

Satélite / Sensor	Lançamento	Número de Bandas Térmicas	Resolução Espacial	Resolução Temporal
Landsat-7 / ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	1999	Banda 6 (10.42 – 12.50 μm)	60 metros	16 dias
TERRA /ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection)	1999	Cinco Bandas (8.125 a 11.65 μm)	90 metros	4 / 16 dias
Landsat-5 / TM (Thematic Mapper)	1984	Banda 6 (10.42 – 12.50 μm)	120 metros	16 dias
CBERS 1-2/ IRMSS (Infrared Multispectral Scanner)	1999	(10,40 – 12,50 μm)	160 metros	26 dias
NOAA / AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)	1979	Banda 4 (10,30 - 11,30 μm) Banda 5 (11,30 - 12,50 μm)	1,1 Km	Diário (AM e PM)
Aqua e Terra / MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	Terra (1999) Aqua (2002)	36 bandas	250, 500 1000 metros	1 a 2 dias
Série GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)	1975	Três Bandas (3,8 – 4,0 μm ; 10,2 – 11 μm ; (11,5 – 12,5 μm)	4 Km	30 minutos
METEOSAT / SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infrared Imager – 2008)	1977	Cinco Bandas (8.30 a 14.40 μm)	3 Km	15 minutos

QUADRO 1 – SENSORES TÉRMICOS EM PLATAFORMAS ORBITAIS
FONTE: INPE (2012)

Com relação ao uso de imagens provenientes de sensores infravermelhos, de acordo com Jensen (2011), devem ser observadas as seguintes relações:

- a energia de comprimento de ondas curtas radiada pelo Sol interage com a atmosfera;
- Uma porção da energia interage com os materiais da superfície da Terra e parte desta energia é transformada em energia de comprimentos de onda longa;
- a energia de ondas longas emitida pelo terreno interage novamente com a atmosfera;

Desta forma, para a interpretação das propriedades térmicas dos objetos obtida por sensoriamento remoto, a preocupação é interpretar as medidas de radiação de uma fonte distante do sensor, em relação à sua temperatura cinética (ou seja, medida por um termômetro). Para isso, inicialmente é necessário admitir que o corpo imageado se comporte como um corpo negro perfeito. O relacionamento entre a energia que deixa um dado corpo e sua temperatura é expressa pela lei de Planck.

Segundo Novo (2009), para esta finalidade é necessário utilizar a função inversa de Planck haja vista que o sensor mede a radiância espectral e o que se pretende determinar é a temperatura do alvo. Como a Equação de Planck foi desenvolvida para o corpo negro (Black Body), a temperatura que é estimada pelo sensor é por convenção chamada de Temperatura de brilho ou Temperatura aparente. A equação 3 descreve a equação de Planck.

$$T_b = \frac{C_2}{\ln\left(1 + \frac{\lambda^5 B_\lambda}{C_1}\right)} \quad (3)$$

Onde:

C_1 e C_2 = são constantes físicas determinadas experimentalmente;

T_b = é a temperatura de brilho do sensor;

λ^5 = é o comprimento de onda;

B_λ = é a radiância em unidade em $W/(m^2 * Sr * \mu m)$;

Nos corpos reais, a radiância (B_λ) é reduzida pela emissividade do material, onde λ^5 é a radiância medida pelo sensor. A emissividade depende do tipo de material e do comprimento de onda, mas varia entre 0,5 e 1,0 no range de materiais conhecidos nas regiões adequadas para o sensoriamento remoto termal.

A FIGURA 6 ilustra o comportamento de três fontes sob a perspectiva da Emissividade e Emitância (ou Radiância).

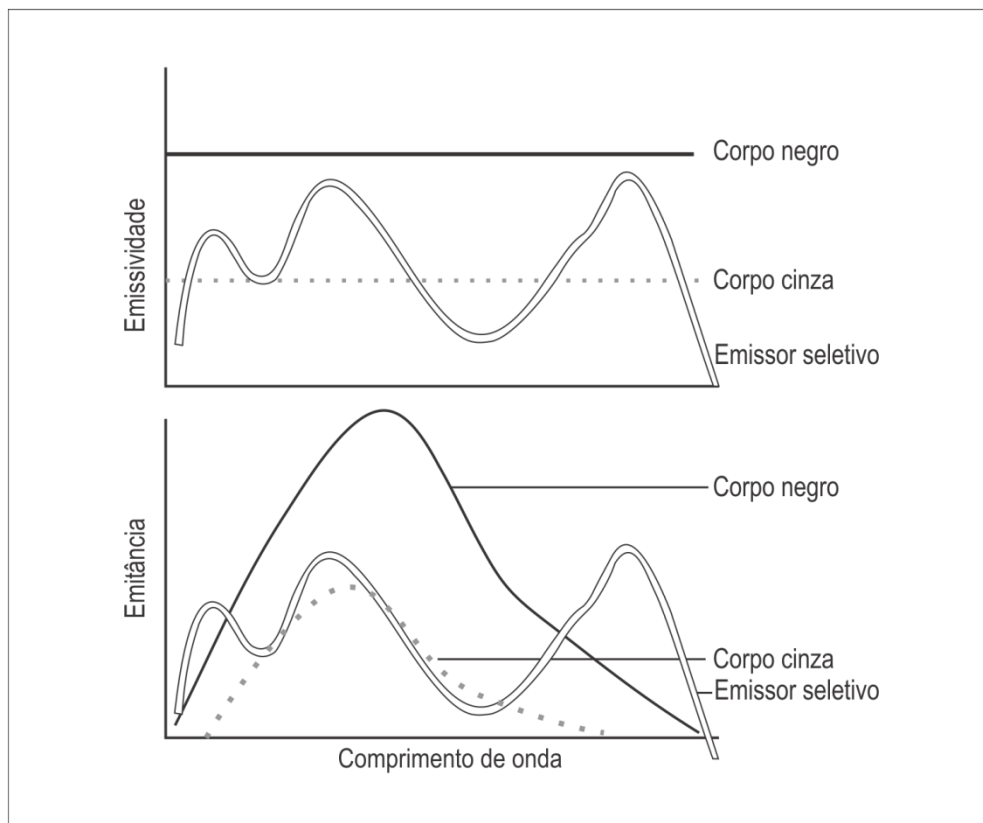


FIGURA 6- EMISSIVIDADE E EMITÂNCIA DE DIFERENTES CORPOS
 FONTE: NOVO (2009)

Conforme a FIGURA 6, as fontes de radiação termal podem se distinguir em três tipos no tocante à emissividade:

- as que se comportam como corpos negros, onde a emissividade é igual a 1;
- as que se comportam como corpo cinza e a emissividade é uma constante menor do que 1;
- as fontes seletivas que correspondem a superfície real, cuja emissividade varia espectralmente.

Estudos comentados por Jensen (2011) apontam que a relação entre a temperatura radiante e temperatura cinética, não é perfeita com as medidas remotas da temperatura radiante, sendo sempre inferiores à temperatura cinética verdadeira do objeto, especialmente para superfícies terrestres.

Segundo Coll *et al.* (2003) para se obter temperaturas de superfície a partir de dados de sensoriamento remoto no infravermelho termal, dois importantes problemas precisam ser resolvidos: (1) compensação pela absorção e emissão atmosféricas na radiância que chega ao sensor; (2) correção dos efeitos de emissividade da superfície, que estão acoplados com a temperatura, radiância emitida pela superfície.

Esta calibração radiométrica pode ser feita usando: (1) fonte de referência de um corpo negro interno, ou (2) referência empírica externa baseada em coleta de dados *in situ*.

De maneira geral, os corpos da superfície da Terra encontram-se à temperatura média de 300k ($\pm 27^{\circ}\text{C}$). Nesta condição, a emissão de temperatura pelos corpos tem o pico máximo por volta de 9,6 μm , que é justamente a região espectral situada dentro da janela atmosférica do termal que vai de 8 a 14 μm ilustrado na FIGURA 7.

Somente por este motivo que os instrumentos de sensoriamento remoto conseguem detectar energia infravermelha nessas regiões, ou seja, a atmosfera permite que uma porção da energia infravermelha seja transmitida do terreno para os detectores.

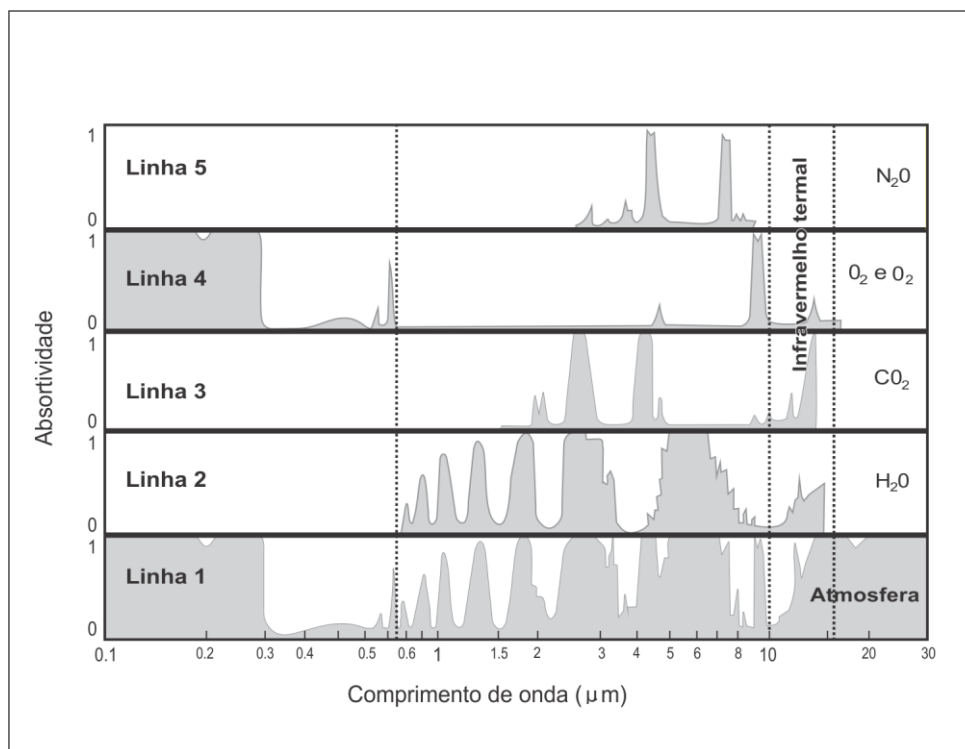


FIGURA 7 - JANELAS ATMOSFÉRICAS E REGIÕES DE ABSORÇÃO
 FONTE: JENSEN (2011)

As janelas atmosféricas (Linha 1 da FIGURA 7) são as regiões pelas quais a energia eletromagnética consegue passar pela atmosfera com menor atenuação sendo captada pelo sensor remoto. Por outro lado, as áreas das Linhas 2,3,4 e 5 denotam as regiões do espectro eletromagnético nas quais a atmosfera absorve a maior parte da energia emitida pela superfície terrestre. Estas regiões são conhecidas como bandas de absorção. O vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), e ozônio (O_3) são responsáveis pela maior parte da absorção. A atmosfera “fecha-se”, fazendo com que seja quase impossível fazer sensoriamento remoto ambiental nessas regiões. Por exemplo, o vapor d'água atmosférico (H_2O) absorve a maioria da energia que deixa o terreno na região 5-7 μm , tornando-se inútil para o sensoriamento remoto infravermelho termal.

A camada de ozônio da Terra (Linha 4) absorve a maioria da energia termal que emana do terreno numa banda de absorção em aproximadamente 9,2 – 10,2 μm . Assim, sistemas orbitais de sensoriamento remoto no

infravermelho termal geralmente registram dados na região de 10,5 – 12,5 μm para evitar esta banda de absorção.

Como exemplo, pode-se citar a banda 12 do sensor ASTER (QUADRO 1) que é de 8,925 – 9,275 μm e a banda 13 que é de 10,25 – 10,95 μm . A região de 9,276 – 10,24 μm não é observada por causa da absorção atmosférica.

De acordo com Moreira (2007), a partir de equipamentos que operam nesta janela atmosférica, é possível medir a radiação emitida pelos alvos na superfície terrestre. Assim, conhecendo-se a emissividade do corpo e a medida da energia emitida, é possível avaliar a temperatura desse corpo. Para quantificar a radiação pelos corpos na superfície terrestre, empregam-se vários radiômetros infravermelhos.

Os radiômetros infravermelhos são construídos de tal modo que a radiação captada pelo coletor é constantemente comparada àquela emitida por um corpo negro, com emissividade igual à unidade (1), a determinada temperatura. Os resultados são apresentados, normalmente, na forma de temperatura de brilho, que seria a temperatura do alvo investigado se este fosse um corpo negro. Entretanto, como os corpos naturais apresentam emissividade menor que 1 e entre o radiômetro e o alvo existe a atmosfera, as temperaturas obtidas por meio deste procedimento são menores que as reais.

Conforme MOREIRA (2007) os radiômetros infravermelhos têm precisão que varia de 0,1 a 0,5 C. Contudo, uma variação de 1,3% na emissividade dos alvos ocasionará uma variação de temperatura da ordem de 1°C, evidenciando uma correta interpretação dos levantamentos radiométricos.

2.3. A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

A dinâmica do uso do solo, dentro de uma perspectiva geográfica, é ponto de destaque para o entendimento de diversos processos recentes que ocorrem na superfície terrestre, sejam eles, naturais ou induzidos pela ação antrópica.

A interação entre a superfície e a atmosfera tem papel importante no sistema climático terrestre. Por exemplo, o processo de urbanização altera as condições atmosféricas de uma região, uma vez que provoca modificações na rugosidade e nas propriedades térmicas da superfície, reduzindo assim a intensidade dos ventos e da umidade do solo (OKE, 1978; 1987; DANNI-OLIVEIRA, 2000). Fora do ambiente urbano, as principais modificações da superfície estão relacionadas ao desmatamento e queimadas, que expõem o solo, os quais alteram o processo de armazenamento de água em superfície e processos relacionados à evapotranspiração.

De acordo com Souza (2008) a TS e o albedo da superfície são fundamentais na estimativa do saldo de radiação, no monitoramento de culturas, estimativa de evapotranspiração e estresse hídrico. Este autor destaca que o sensoriamento remoto é indispensável para o monitoramento do uso racional dos recursos hídricos, principalmente devido ao grande volume de água perdido para a atmosfera na agricultura irrigada.

Para Mesquita (2012) a TS é uma variável biofísica com aplicações na meteorologia e em estudos dos recursos naturais, principalmente na estruturação de modelos de balanço de energia e bioclimáticos.

É uma variável que deve ser considerada na análise de climas locais, uma vez que o aquecimento diferencial das superfícies potencializa a diferenciação climática local (STEINKE, 2004).

Neste sentido, os dados do sensor infravermelho termal têm sido amplamente usados para obtenção da TS em diferentes escalas de análise (com exemplo, Fuckner, 2008, Polizel, 2009; Santos, 2010; Trentin *et al.*, 2011; Andrade, 2011).

Segundo Santos (2010) o estudo da TS também possui aplicabilidade na agricultura, uma vez que a variabilidade termal da superfície interfere diretamente na germinação e na atividade metabólica das plantas.

Maiores detalhes sobre a estimativa da temperatura de superfície, segundo Voogt e Oke (2003), podem ser consultados em Becker e Li (1995)², Norman e Becker (1995)³, Norman Divakarla e Goel (1995)⁴ e Prata, Caselles, Coll e Sobrino (1995)⁵ que examinaram as potencialidades e associações do sensoriamento remoto térmico com a superfície terrestre.

2.3.1. Aplicação da temperatura de superfície em estudos ambientais

Dentre as principais aplicações da TS a partir de imagens termais a nível orbital destacam-se os estudos meteorológicos (FERREIRA, 2010).

No Brasil, segundo Florenzano (2007) estima-se que ocorrem mais de 300.000 queimadas anualmente. Essas queimadas vêm sendo detectadas em imagens de satélite, por pesquisadores do INPE, desde a década de 1980. Para essa finalidade, as informações sobre queimadas são geradas pelas imagens termais dos satélites meteorológicos NOAA, GOES, Terra e Aqua. A importância desse monitoramento possui extrema relevância devido as modificações climáticas ocasionadas pela remoção de árvores e emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, concentração de aerossóis, balanço de energia e mudança no regime pluviométrico a nível global.

Dados de temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila superficial, ventos, entre outros de ambientes marinhos, considerando as técnicas atuais, podem ser obtidos a partir de satélite em tempo quase real através dos *websites* dos institutos de pesquisas espaciais.

² Becker, F., & Li, Z. L. (1995). Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems. *Remote Sensing Reviews*, 12, 225-253.

³ Norman, J.M. and Becker, F., (1995). Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 153-166.

⁴ Norman, J. M., Divakarla, M., & Goel, N. S. (1995). Algorithms for extracting information from remote thermal-ir observations of the Earth's surface. *Remote Sensing of Environment*, 51, 157-168.

⁵ Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., & Sobrino, J. A. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12, 175-223.

Para os estudos geológicos a radiância aparente da superfície que emerge do terreno é analisada de tal forma que os efeitos da temperatura são removidos e tudo o que resta é a informação de emissividade do terreno. A informação de emissividade então é usada para mapear minerais na superfície terrestre com base nas características documentadas de suas emissividades (JENSEN, 2011).

Vicente e Souza Filho (2010), com base em técnicas de processamento digital de interbandas e emprego da banda TIR do sensor ASTER, conseguiram aumentar a precisão da detecção e quantificação do quartzo na fração de solos arenosos analisados em relação aos argilominerais, possibilitando assim o monitoramento da degradação de terras em solos tropicais.

Alcântara (2010) verificou as variações espaciais e temporais do campo de temperatura de superfície da água do reservatório de Itumbiara (GO) utilizando o sensor MODIS a bordo do satélite Terra. Neste estudo foi possível estimar cada componente do fluxo de calor e verificar a dinâmica dos fluxos de calor, durante o dia (~10h:30) e a noite (~23h:30). Esta autora observou que durante o dia a temperatura da água aquece do centro para margem e a noite o processo é invertido. Apesar de ser uma superfície homogênea, foi observado que nos reservatórios a temperatura de superfície estimada modifica durante os anos.

Gusso *et al.*(2007), avaliaram três métodos para medição de TS utilizando o sensor orbital AVHRR/3 NOAA classe POES, e o consideraram adequado para o mapeamento de TS. Nesta análise os três métodos apresentaram resultados próximos da temperatura do ar (TA) medida nos locais selecionados. Entre os métodos avaliados, o método de Sobrino *et al.* (2001) foi o mais adequado para a estimativa da TS nas condições de cobertura do solo que predominam no Estado do Rio Grande do Sul.

Trentin *et al.* (2009) compararam 35 imagens de TS, geradas a partir das bandas do infravermelho do sensor MODIS (MOD11), com os dados das estações meteorológicas do estado do Paraná, no mesmo horário da passagem do sensor. Estes autores constataram que a TS é mais elevada que a temperatura do ar (TA) para todos os pontos, principalmente na região metropolitana de Curitiba, que possui a área mais urbanizada entre os pontos

analisados. Estes autores também constataram que a variação anual das temperaturas é equivalente ao longo do ano, sendo sempre a TS mais elevada que a TA.

Lazarim e Zullo Junior (2011) utilizaram dados da temperatura de superfície a partir do AVHRR/NOAA para o monitoramento e detecção de geadas no estado do Paraná.

Andrade *et al.* (2006) utilizaram o sensor infravermelho termal do TM/Landsat-5 (120m) e o sensor aerotransportado HSS (2,7 e 8,3m) para estudar ilhas de calor da cidade de São José dos Campos. Estes autores constataram que o sensor TM/Landsat-5, devido à escala, promove uma maior homogeneização da temperatura de superfície. Ao contrário disso, o sensor HSS com alta resolução espacial, revelou maior heterogeneidade dos mesmos espaços analisados pelo sensor TM.

Coltri (2006) identificou que as ilhas de calor são mais intensas no verão e são representadas por locais com excesso de material construtivo e pouco ou nenhuma área verde. Para o município de Piracicaba, essa autora constatou que as ilhas de calor variam sazonalmente, espacialmente e a intensidade destas, ao longo das estações do ano, está intimamente relacionada com o período de cultivo de cana-de-açúcar. Os resultados desta autora sugerem que o uso e a cobertura do solo rural e urbano é um dos grandes agentes modificadores do clima local e regional.

Liu e Zhang (2011) constataram a partir das imagens termais TM/Landsat e Aster que a distribuição das ilhas de calor urbano da cidade de Hong Kong estão localizadas principalmente nas áreas de grandes conglomerados urbanos ao norte da ilha e do Aeroporto Internacional de Hong Kong. Em comparação as cidades-satélites a distribuição dispersa de efeitos de ilha de calor urbano. Assim, sugerem os autores que é razoável prever a criação de cidades satélites com layout separado do centro de negócios, a fim de evitar a formação de uma ilha de calor urbano regional em larga escala.

De acordo com Silva (2004a), Sousa e Baptista (2005) e Santos (2010), as imagens provenientes dos satélites com resolução mais grosseira como, por exemplo, o NOAA/AVHRR, são aplicáveis aos estudos climáticos de grandes centros urbanos e em escala regional. Já as imagens do infravermelho térmico de maior resolução espacial, como Landsat 5 e 7 com resolução 120 e 60

metros respectivamente, que foram utilizadas por (Mendonça, 1994; Mendonça e Dubreuil, 2005; Xian e Crane, 2006; Oliveira et al 2009, entre outros), se tornaram importantes ferramentas para o estudo da configuração e da variação térmica do ambiente intraurbano.

Conforme os autores supracitados, as imagens térmicas tem ampla utilidade em estudos ambientais com ênfase especialmente nas condições atmosféricas e suas repercussões. Além disso, encontram-se empregadas principalmente em aplicações para estimativa da temperatura da superfície, subsidiando assim, efetivamente os estudos urbanos como a análise de ilhas de calor em diversos países.

Segundo Mendonça (1994), o campo térmico das cidades, enquanto subdivisão do clima urbano tem sido aquele no qual mais se tem empregado as imagens de satélites, de maneira especial para o estudo das ilhas de calor urbano. Ainda, Mendonça (2003), considera que o emprego de imagens Landsat tem sido satisfatório para a identificação e análise do uso e ocupação do solo, da distribuição das construções, da biodiversidade, da morfologia, da funcionalidade, da poluição, entre outros.

Diante do exposto, o próximo subcapítulo tem como objeto principal elencar os principais tópicos relacionados ao estudo da temperatura de superfície urbana, com ênfase nos estudos de ilhas de calor.

2.3.1. A temperatura de superfície aplicada ao estudo de ilhas de calor

As paisagens urbanas que substituíram grandes áreas naturais de cobertura vegetal contribuem para o aumento da TA e, conseqüentemente, para a intensificação do efeito de ilhas de calor (LOMBARDO, 1985; GARTLAND, 2010).

Oke (1982,1987) argumenta que as ilhas de calor podem ser definidas para diferentes camadas da atmosfera urbana, para várias superfícies ou mesmo para subsuperfícies.

Desta maneira, é importante aqui fazer uma distinção entre as diferentes ilhas de calor e seus mecanismos.

No geral, segundo Fuckner (2008), são estudadas duas formas de ocorrência de ilhas de calor: a da camada do dossel urbano, conhecida como Urban Canopy Layer (UCL) que é a camada de ar localizada abaixo do nível dos telhados ou cobertura das edificações que produz processos de microescala que atuam nas ruas (cânions) entre os edifícios. E a camada limite urbana ou Urban Boundary Layer (UBL) que se localiza acima da camada UCL, e é influenciada pelos padrões da superfície.

Uma ilha de calor urbano (ICU) clássica refere-se ao excesso de calor da atmosfera urbana comparado com o ambiente não urbanizado. As ilhas de calor atmosférico são melhores expressas em condições de calma e noite de céu limpo, acima do dossel urbano, influenciada pela superfície urbana (OKE, 1982). As medidas dos fluxos atmosféricos e quantidades escalares da TA nestas alturas são influenciadas pela turbulência dos ventos, concentração de poluentes e condições da superfície.

Gartland (2010) aponta que a maneira ideal para medir uma ilha de calor em qualquer cidade seria examinar os padrões do clima regional com e sem a cidade. Como não é possível remover a cidade, salienta esta autora que existem cinco métodos básicos que são utilizados para medir os efeitos da urbanização sobre o clima urbano, sendo eles: estações fixas, transectos móveis, balanço de energia, sensoriamento vertical e sensoriamento remoto.

Por este ponto de vista, o estudo da temperatura de superfície (TS) tem papel relevante nas consequências mencionadas, uma vez que superfície incorpora os efeitos da radiação solar sobre as propriedades termodinâmicas dos materiais que a compõem, modificando assim os padrões térmicos da superfície terrestre em diversas escalas.

Desta maneira, com o apoio de sensores remotos, estas modificações vêm sendo investigadas por vários pesquisadores e subsidiando uma gama de estudos em diversas áreas, como na aplicação em estudos climáticos no Brasil como (Lombardo, 1985; Mendonça, 1994; Collischonn, 1998; Steinke, 2004; Dumke, 2007; Moreira, 2009; Saydelles, 2010), balanço de radiação (Giongo, 2011, Mesquita, 2012), irrigação (Folhes, 2005), monitoramento de incêndios florestais realizados pelo INPE e SIMEPAR, entre outros.

Para atender a especificidade desta variável espacial, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto tem proporcionado um monitoramento constante, tanto em áreas de baixa e alta densidade populacional (WENG, 2009). Ressalta-se aqui, que o monitoramento convencional, por estações meteorológicas, é capaz de registrar a TA, e os sistemas remotos orbitais e aerotransportados tem a capacidade de registrar a superfície e nuvens.

Por meio de sensores térmicos remotos é possível capturar os padrões espaciais de emissão da radiação térmica (temperatura de brilho) da superfície. O campo de visada instantânea do sensor (IFOV), que corresponde à área do terreno imageada pela altitude de posicionamento do sensor, é significativamente diferente de uma perspectiva tridimensional da estrutura da superfície urbana. Desta forma, trata-se de uma medida indireta do campo térmico da superfície. Ainda para este método é necessário considerar a intervenção atmosférica e propriedades superficiais que influenciam a emissão e a reflexão da radiação detectada pelo sensor.

Sendo assim, uma imagem da temperatura da superfície, elaborada a partir de um sensor térmico não se caracteriza propriamente como uma ilha de calor clássica, sendo o mais correto utilizar o termo “Ilha de calor de superfície urbana (ICSU)” (Voogt e Oke, 2003).

Nichol (1996) argumenta que os estudos que utilizam dados termais de alta resolução espacial não analisam as ilhas de calor, mas os padrões da temperatura de superfície.

Collischonn (1998) avaliou que as imagens do satélite Landsat encontraram uma aplicação no domínio da climatologia local através da utilização do canal infravermelho térmico do sensor TM. No entanto, ainda subutilizada na avaliação de políticas ambientais e de planejamento urbano.

Estas imagens possibilitam a observação da variação térmica de superfície intraurbanas de grandes cidades como observado por Lombardo (1985) e Moreira (2009), em cidades de menor porte por Mendonça (1994) Saydelles (2005), e variação térmica de superfície de áreas rurais por Folhes (2005) e a diferença entre as áreas de cultura e urbanas por Coltri (2006).

2.3.2. Principais aplicações do sensoriamento remoto para estudo da temperatura de superfície em ambiente urbano

Na opinião de Voogt e Oke (2003) e Weng (2009), foi Rao⁶ (1972) o primeiro a realizar observação de ilhas de calor de superfície urbana (ICSU) utilizando imagens de satélite. Deste então, uma variedade de combinações de plataformas e sensores (satélites, aeronaves, groundbased) tem sido empregados para realizar a observação remota de ICSU e temperatura de superfície em diversas escalas.

O QUADRO 2 organizado por Voogt e Oke (2003) resume os principais estudos que aplicaram o sensoriamento remoto termal para estudos de clima urbano.

Estudo	Plataforma / Sensor	Aplicação
Balling e Brazel (1988)	Sat: AVHRR	Relation between surface temperature patterns and land use and day-to-day variability of spatial patterns.
Dousset (1989)	Sat: AVHRR	Surface and air temperature relationships over an urban area.
Henry et. Al. (1989)	Sat: HCMM	Urban heat island analysis using remote sensing, ground observations and modelling.
Carnahan and Larson (1990)	Sat: Landsat TM	Urban– rural heating and cooling differences.
Caselles et al. (1991)	Sat: AVHRR	Satellite and ground-based heat island analysis.
Dousset (1991)	Sat: AVHRR, SPOT	Multispectral classification of urban land use areas and their relation to surface temperature.
Johnson et al. (1991)	Ground-based IRT	Surface urban heat island model.
Eliasson (1992)	Ac: AGEMA	Correlation between ground surface temperature and sky view factor.

continua

⁶ RAO, P.K. **Remote sensing of urban “heat islands” from an environmental satellite.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.53, p.647-648, 1972.

Estudo	Plataforma / Sensor	Aplicação
Kim (1992)	Sat: Landsat TM	Energy balance modelling of an urban area.
Gallo et al. (1993a, 1993b)	Sat: AVHRR	Use of NDVI to assess the urban heat island.
Lee (1993)	Sat: AVHRR	Air and surface heat island assessment of Korean cities in relation to urban development.
Johnson et al. (1994)	Sat: TOVS	Estimation of rural air temperatures from satellite sounding data for deriving urban air temperature bias.
Quattrochi and Ridd (1994)	Ac: TIMS	Day and nighttime thermal response of individual urban surface types.
Shoshany et al. (1994)	Ac: Thermal Scanner	Extraction of roof top temperatures for heat island analysis.
Aniello et al. (1995)	Sat: Landsat TM, MSS	Spatial distribution of urban surface temperatures and tree cover.
Epperson et al. (1995)	Sat: AVHRR, DMSP	Estimating urban air temperature bias using NDVI and nighttime light data.
Gallo et al. (1995)	Sat: AVHRR	Review of procedures and future prospects for satellite assessment of urban heat island effects.
Gallo and Tarpley (1996)	Sat: AVHRR	Effect of compositing on the use of NDVI for assessing heat island effect.
Iino and Hoyano (1996)	Ac: MSS	Urban energy balance modelling using remote sensing and GIS databases.
Lougeay et al. (1996)	Sat: Landsat TM	Temperature patterns associated with land use and land use change.
Nichol (1996)	Sat: Landsat TM	Spatial patterns of surface temperature in relation to urban morphology.
Ben-Dor and Saaroni (1997)	Ac: TIRs	Simultaneous surface and air temperature heat island analysis.
Lo et al. (1997)	Ac: ATLAS	Relation of thermal data to land cover and NDVI.

continua

Estudo	Plataforma / Sensor	Aplicação
Voogt and Oke (1997)	Ac: AGEMA	Creation of areally representative urban surface temperatures.
Nichol (1998)	Sat: Landsat TM	Incorporation of wall surface temperatures with remote sensing to create three-dimensional representation of urban temperatures.
Owen et al. (1998)	Sat: AVHRR	Use of thermal and NDVI data coupled with SVAT models for investigating climate change associated with urbanization.
Voogt and Oke (1998)	Ac: AGEMA	Thermal anisotropy of urban surfaces.
Carlson e Sanchez-Azofeifa (1999)	Sat: AVHRR	Urban microclimate change associated with urbanization.
Hafner and Kidder (1999)	Sat: AVHRR	SUHI and UHI patterns associated with thermal inertia and moisture availability.
Hoyano et al. (1999)	Ground-based thermal scanner	Calculation of sensible heat flux from individual buildings.
Parlow (1999)	Sat: Landsat TM	Energy balance modelling of an urban area using multispectral methods.
Wald and Baleynaud (1999)	Sat: Landsat TM	Air quality assessment using thermal remote sensing.
Quattrochi et al. (2000)	Ac: ATLAS	Use of thermal remote sensing in a GIS framework to assess urban heat islands.
Soux et al., (2000)	Tower/IRT	Three-dimensional sensor view model of urban surfaces.
Voogt (2000)	Ac: AGEMA	Areally representative urban surface temperatures at different scales.
Voogt and Grimmond (2000)	Ac: AGEMA	Sensible heat flux modelling and estimation of surface thermal roughness lengths of an urban area using thermal remote sensing and ground observations.
Voogt and Soux (2000)	Tower/Thermal Scanner, IRT	Local scale urban thermal anisotropy.

QUADRO 2 - APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL EM ESTUDOS DE CLIMA URBANO

FONTE: VOOGT E OKE (2003, p. 374).

Conforme o QUADRO 2, muitos estudos têm utilizado sensores térmicos remotos para examinar o padrão da estrutura espacial da térmica urbana e sua relação com as características da superfície urbana.

O segundo tema com maior frequência apresentado pelo QUADRO 2 é a aplicação da detecção térmica para o estudo do desenvolvimento urbano e balanço de energia de superfície. Estes trabalhos foram realizados com o apoio de modelos climáticos do ambiente urbano, técnicas de sensoriamento remoto e observações em campo, como exemplo: Kim (1992); Hafner e Kidder (1999); Parlow (1999).

O terceiro grande tema abordado no QUADRO 2 é a aplicação de sensoriamento remoto termal para estudar a relação entre ilhas de calor atmosférica e ilhas de calor de superfície urbana. Vários estudos combinam observações remotas e terrestres de forma simultânea: Caselles *et al.* (1991); Dousset, 1989, 1991; Stoll e Brazel (1992); Lee (1993); Ben-Dor e Saaroni (1997) e alguns também adotam modelos de atmosfera urbana Henry *et al.* (1989); Hafner e Kidder (1999).

De acordo com Voogt e Oke (2003) muita ênfase tem sido colocada no uso de diferenças de área urbanas e rurais. Para mensurar as propriedades superficiais produzidas por estes dois ambientes e sua capacidade de armazenamento de calor e evaporação, tem-se empregado em vários trabalhos listados no QUADRO 2 o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A adoção do NDVI é motivada uma vez que este índice permite a partir da razão adimensional entre os fluxos radiantes refletidos pelo infravermelho próximo e vermelho, indicar a abundância relativa da vegetação ou sua ausência.

Segundo Gartlant (2010) a vegetação possui papel importante para redução da TS e o material construído (concreto, asfalto) tem maior capacidade em armazenar e liberar energia térmica.

No Brasil, o primeiro estudo sobre ilhas de calor foi realizado por Lombardo (1985), com imagens multitemporais AVHRR da cidade de São Paulo. Através desta metodologia, esta autora detectou cerca de até 10°C de amplitude térmica entre diferentes superfícies da cidade de São Paulo, permitindo assim caracterizar a presença de uma ilha de calor em São Paulo.

Mendonça (1994) propôs uma metodologia para o estudo do clima urbano de cidades de pequeno e médio porte. Para realização desta pesquisa, este autor empregou imagens térmicas dos sensores AVHRR/NOAA-11 e TM/Landsat-5 subsidiando estes resultados com dados coletados em campo, juntamente com os aspectos geoecológicos da área de estudo.

Collischonn (1998) empregou imagens do satélite TM/Landsat-5 para avaliação do campo térmico da Região Metropolitana de Porto Alegre. Neste estudo, a autora adotou técnicas de processamento digital para correção da emissividade da superfície urbana e rural.

Steinke (2004) validou o método de estimativa da TS utilizando o sensor TM/Landsat-5 para identificação de áreas termicamente distintas no Distrito Federal, sugerindo o emprego desta estimativa para o planejamento ambiental. Porém, segundo esta autora ainda não é possível extrapolar os dados captados pelo sensor para temperatura do ar.

Diferentes métodos para obtenção de TS a partir do sensor Landsat-5 e 7 têm sido empregados para estudo do clima urbano local e identificação de ilhas de calor em cidades brasileiras como em Santa Maria/RS (Saydelles, 2005), em Piracicaba/SP (Coltri, 2007), em Recife (Moreira, 2009) em Goiania (Nascimento, 2010).

Apesar dos recentes estudos brasileiros apresentados somados aos listados no QUADRO 2, pouco progresso tem sido feito sobre a avaliação das superfícies urbanas por meio de sensores remotos. As principais dificuldades ainda permeiam os problemas apontados por Roth *et al.* (1989, citado por Voogt e Oke, 2003), que são inerentes a definição da superfície observada e definições de harmonização da rugosidade da superfície, o que representa um problema significativo para climatologia urbana. Outra dificuldade ainda não superada é a estimativa provocada pela turbulência do fluxo de calor entre a temperatura de superfície e a temperatura aerodinâmica.

Desta maneira, entende-se que a principal vantagem do sensoriamento remoto esta na possibilidade de captar a TS em grandes áreas a partir da conversão do fluxo radiante em TS considerando as limitações impostas pela aquisição da imagem e a ausência de modelos que permitam estimar o campo térmico produzido pela gama de variáveis que envolvem o clima urbano.

2.3.3. Limitações para a estimativa da temperatura de superfície

A obtenção da TS por sensores remotos térmicos tem sido objeto de vários comentários de Carlson *et al.* (1995), Norman *et al.* (1995), Prata *et al.* (1995), Qin e Karnieli (1999) citados por Voogt e Oke (2003), Sobrino *et al.* (2004) e Weng (2009).

Para estes autores, uma das limitações apontadas para a obtenção da TS é que a radiação detectada pelo sensor está sujeita aos efeitos de absorção e emissão atmosférica entre o sensor e a superfície. Além disso, a estimativa da TS pode ser comprometida pelas características da superfície, especialmente sua emissividade e sua forma geométrica (OKE, 1987; WENG, 2004).

Assim sendo, as correções atmosféricas são sugeridas para melhorar os resultados obtidos para a estimativa da TS (QIN *et al.*,2001; SONG *et al.*,2001; SOBRINO *et al.*,2004). Apesar disso, é importante salientar que existe pouca informação sobre o papel desempenhado pelas variações espaciais conhecidas, como a transmissividade da radiação eletromagnética em áreas urbanas (VOOGT e OKE 2003).

Com relação à superfície terrestre, a heterogeneidade e rugosidade do terreno são questões importantes que devem ser observadas, principalmente quando se trata de superfícies urbanas. Outro problema inerente ao sensoriamento remoto é a natureza tridimensional urbana que atrelada as diferentes combinações geométricas entre a altura sol e a posição do sensor remoto (WENG, 2009) produzem uma gama de valores diferenciados conforme a época do ano. Assim, o ângulo de Nadir⁷ de visada do sensor remoto sobre a superfície urbana pode captar temperaturas mais elevadas ou mais frias que em visadas off-nadir⁸, dependendo assim da direção da visada do sensor em relação a posição solar (WENG, 2009).

⁷ **Nadir** trata-se do ponto no espaço diretamente abaixo do sensor remoto, formado por uma projeção de alinhamento vertical (ângulo de 90°) em relação à superfície terrestre.

⁸ A posição **Off Nadir** representa uma inclinação de um alinhamento <> que 90° em relação a posição do sensor e ponto da superfície observada.

Outras observações indicam que anisotropia permanece surpreendentemente forte em áreas residenciais com baixas alturas de construção e grande quantidade de vegetação. A terminologia da anisotropia no estudo do sensoriamento remoto refere-se a dificuldade obter medidas térmicas devido a rugosidade do terreno (VOOGT e OKE,2003).

Para estas áreas, em microescala, a estrutura de algumas superfícies urbanas, como telhados pontiagudos e especialmente a anisotropia criada devido aos padrões de sombreamento por edifícios e pelas copas das árvores podem estar influenciando estes fatores. Os efeitos das propriedades térmicas e estruturais das cidades, como descrito por Roth *et al.* (1989, citado por Voogt e Oke, 2003), reduzem a admissão térmica, conforme ângulo de visada do sensor remoto. No entanto, ainda não existem estudos observados a longo prazo de áreas urbanas para avaliar a natureza temporal da anisotropia eficaz em relação à variação do ângulo zenital⁹.

O uso de técnicas de geoprocessamento podem proporcionar maiores detalhes das representações das superfícies urbanas em combinação com os dados obtidos por sensoriamento remoto, permitindo assim várias outras combinações de análise da superfície. Algumas técnicas já foram aplicadas ao estudo de aerodinâmica urbana como, por exemplo, no trabalho de Grimmond e Oke (1999).

Recentemente, a combinação de parâmetros da superfície extraídos remotamente, como o NDVI combinado com ISA (Área de superfície impermeável) utilizado por Xian e Crane (2006) e NDVI e NDBI¹⁰ (Diferença Normalizada de Construção) aplicada por Liu e Zhang (2011) tem reforçado a parametrização dos estudos de TS em áreas urbanas. A utilização de sensores com alta resolução informações de sensoriamento remoto multiespectral (por exemplo, IKONOS), ou talvez imagens de radar, podem contribuir para uma melhor caracterização da superfície urbana no que se refere à compreensão das observações remotas de imagens térmicas com maior detalhe.

Com relação às características da superfície urbana, alguns estudos incorporam correções da emissividade variável com base nas características

⁹ O **ângulo zenital**(Zênite) trata-se do inverso do Nadir, no caso em relação a posição do sensor remoto.

¹⁰ **NDBI (Normalized Difference Built-up Index)** distingue as áreas construídas e urbanas pela diferença normalizada entre as bandas do Infravermelho próximo e Infravermelho médio.

de uso do solo como em (Balling e Brazel, 1988; Caselles *et al.*, 1991; Lougeay *et al.*, 1996) citados por Voogt e Oke (2003) e com valores de emissividade derivados das propriedades dos materiais encontrados na natureza.

A emissividade aplicada a superfícies urbanas têm variado desde 0,87 (Balling e Brazel, 1988) até 0,97 (Dousset, 1989; Henry *et al.*, 1989), com a maioria dos valores no intervalo de 0,92 a 0,95, citados por Nichol (1994).

Van de Griend e Owe (1993) demonstraram que há uma forte correlação entre indicadores de vigor de vegetação obtidos pelo uso do NDVI e a emissividade da superfície.

Valor e Caselles (1996) desenvolveram um modelo teórico que justifica a associação encontrada em Van de Griem e Owe (1993) para obter estimativas precisas de emissividade em diferentes tipos de ambiente.

Apesar destes estudos, de acordo com Voogt e Oke (2003), ainda existem poucas observações diretas de emissividade da superfície urbana.

Neste sentido, cabe destacar que as transformações das propriedades radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas causadas pelo processo urbano implicam na alteração do balanço de radiação e energia da superfície terrestre (GARTLAND, 2010).

Em consequência dos fatores apresentados, existe um aumento do calor armazenado pela superfície, devido à condutividade térmica e capacidade dos materiais utilizados em um maior acúmulo do saldo de radiação em áreas urbanas do que em áreas rurais, ocasionado pela menor reflectância solar dos materiais urbanos, geometrias e níveis de poluição mais elevados nos centros urbanos.

Neste cenário, vários estudos urbanos têm sido desenvolvidos como exemplo, a análise da relação entre a temperatura da superfície e o uso da terra por Weng *et al.*, (2004), e análise dos padrões de temperatura da superfície em função da geometria, orientação e altura dos edifícios por Nichol (1994, 1996).

Segundo Collischonn (1998) os valores de albedo são variáveis também em função da textura, mas principalmente em função da cor dos materiais. Como exemplo, um solo escuro seco tem menor albedo que um solo seco claro e, portanto, absorve mais radiação solar. O fato do albedo médio das cidades

(0.15) ser menor do que o de áreas cultivadas (0.18 – 0.25), explica a maior absorção da radiação que atinge a superfície urbana.

Conforme Santos (2010) existem algumas compilações mais recentes da emissividade espectral dos materiais urbanos mais comuns que estão disponíveis para os sensores MODIS (UCSB biblioteca emissividade: <http://www.icesb.ucsb.edu>) e ASTER (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>).

Sobrino *et al.* (2004) notaram que os algoritmos disponíveis para recuperar emissividade da superfície dependem do ângulo da refletividade bidirecional da superfície e aplicações de correções atmosférica. De acordo com estes autores, nenhum estudo examinou a primeira questão sobre áreas urbanas, e o efeito da variação espacial da transmissão atmosférica em áreas urbanas não tem sido bem estudada em relação à aplicação do sensoriamento remoto termal.

Na opinião de Weng (2009) ao estender a análise para escalas maiores, usando observações atmosféricas de temperatura de brilho direcional, as correlações podem se tornar mais pobres devido à mistura de superfícies dentro do sensor IFOV¹¹. Em escalas típicas da maioria dos sensores de satélites, o IFOV do sensor térmico irá captar uma mistura substancial das superfícies que pode incorporar algum tipo de ruído substancial.

Vários estudos têm utilizado imagens térmicas para identificação de ilhas de calor em ambiente urbano (WENG, 2009). No entanto, estas medidas são obtidas apenas para instante e refletem a temperatura emitida pelos objetos e não da camada de ar que está sobre a superfície.

Do ponto de vista de Lombardo (1985) as correlações entre a TS com a temperatura do ar (TA) são melhoradas à noite, conforme ilustrado na FIGURA 8, onde a advecção de microescala é reduzida.

Conforme essa autora, no período da noite, as diferenças de TS e do ar deverão ser minimizadas devido à ação dos ventos, mistura e perturbações da camada de inversão.

¹¹ IFOV – define a área do terreno focalizada a uma dada altitude pelo instrumento sensor.

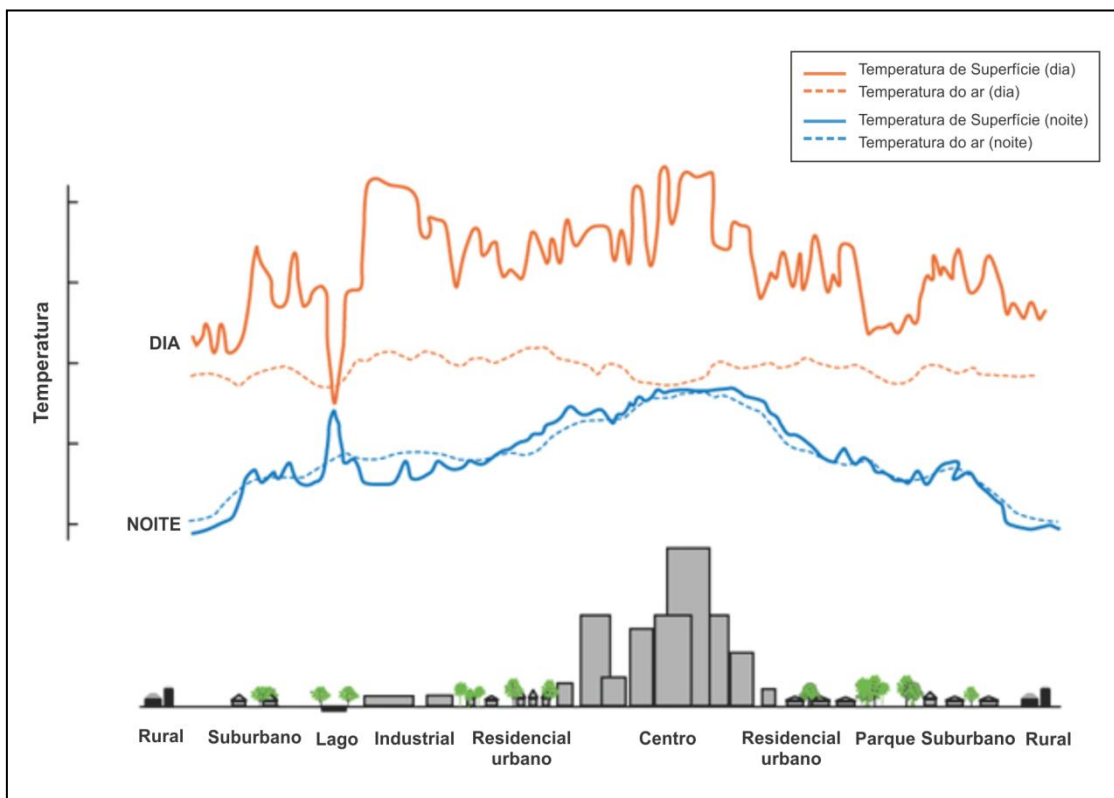


FIGURA 8 - COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE E DO AR DURANTE O DIA E NOITE

FONTE: www.epa.gov (acessado em 2012)

Para Oke (1989) a explicação das diferenças da temperatura da superfície e do ar permanece enraizada no estudo detalhado da micrometeorologia e da geografia e só são suscetíveis de serem previstas por meio da aplicação de estudo em detalhe juntamente com modelos que contemplem a relação próxima entre a superfície e a atmosfera.

2.3.4. Considerações a respeito da obtenção da Temperatura de Superfície a partir de técnicas de sensoriamento remoto

Em síntese, na bibliografia consultada, nacional ou internacional, existe uma grande dificuldade na aplicação de correção atmosférica e para a estimativa da emissividade da superfície. Constate-se, sobretudo a dificuldade em estudos urbanos, devido principalmente à limitação da existência de dados atmosféricos precisos e da heterogeneidade da superfície.

Apesar da existência de equipamentos para coleta destes dados, como no caso de radiossondas transportadas por balões meteorológicos que medem vários parâmetros atmosféricos, e de modelos físicos, como os modelos radiativos que simulam os parâmetros atmosféricos com base em informações terrestres, constata-se restrição do emprego destes recursos devido principalmente ao custo de aquisição, e até mesmo pela dificuldade para coletar estas informações atmosféricas durante o momento da passagem do sensor sobre a área de estudo.

Ainda que existam algoritmos de tratamento que sejam próximos dos resultados apresentados pelos modelos radioativos, como por exemplo, as propostas de correções apresentadas por Qin *et al.* (2001) e Allen *et al.* (2002), estas acabam se tornando insuficientes devido a heterogeneidade da superfície e escala de visada do sensor. Ainda assim, outra limitação não tratada por estes modelos são os fluxos dos ventos e o formato tridimensional do terreno (VOOGT e OKE, 2003).

Apesar das limitações impostas, a aplicação do sensoriamento remoto e das técnicas de processamento digital de imagem ainda são válidas uma vez que permitem, mesmo que carentes de tratamentos sofisticados de correção em detalhe à observação da evolução do comportamento térmico da superfície de forma qualitativa, tanto na escala temporal como espacial.

As dificuldades apresentadas nesta revisão ainda precisam de melhores tratamentos. No entanto, a proposta deste trabalho visa contribuir com o entendimento da evolução térmica da superfície do AU-RMC em diferentes cenários conforme a disponibilidade de dados remotos em diferentes estações

do ano, ou seja, quando estes dados são passíveis de serem captados com ausência de nuvens ou por falhas inerentes ao sensor TM/Landsat-5.

De acordo com a revisão da bibliografia, os problemas apresentados neste capítulo estão principalmente relacionados as limitações do próprio sensoriamento remoto e modelos de correção existentes devido a complexidade da superfície terrestre. No entanto, apesar destas limitações o uso do sensoriamento remoto propicia a geração de uma gama de produtos temáticos que auxiliam na identificação de diferentes fenômenos que podem ser observados pelo canal do infravermelho térmico.

Todavia, nada adianta a aplicação de técnicas sofisticadas de geoprocessamento para obtenção da TS se as modificações estruturais que ocorreram ao longo das últimas décadas não forem consideradas para o entendimento deste fenômeno espacial.

Neste sentido, o próximo capítulo procura elucidar os principais eventos espaciais que contribuíram para o processo de formação do AU-RMC com base no crescimento da mancha urbana a partir da cidade polo.

3. O AGLOMERADO URBANO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

Neste capítulo são abordados alguns aspectos relevantes sobre as características da formação espaço-temporal do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba (AU-RMC).

Esta discussão é pertinente para auxiliar na compreensão do crescimento físico-territorial da mancha urbana e seu papel na modificação do balanço energético dos espaços intraurbanos durante as décadas de 1950 a 2010, o qual servirá como subsídio para o entendimento do campo térmico do AU-RMC que discutido nesta pesquisa.

No primeiro subcapítulo foi realizada a delimitação espacial da área do aglomerado urbano na RMC, bem como sua caracterização fisiográfica.

No subcapítulo seguinte, realizou-se um levantamento das principais episódios e peculiaridades que marcaram a evolução da urbanização da RMC, destacando assim os aspectos econômicos e estruturais que vieram a repercutir no atual arranjo da cidade de Curitiba.

Nesta sistematização temporal são apresentados os principais planos que orientaram a atual formação territorial da mancha urbana, denominada neste trabalho como AU-RMC.

Em um segundo momento do subcapítulo 3.2, discute-se as implicações que vieram a delinear a conurbação da cidade de Curitiba com os municípios limítrofes.

Em paralelo aos tópicos mencionados, serão apresentados os principais efeitos ambientais ocasionadas pela urbanização.

Por fim, são apresentadas algumas considerações sobre os estudos urbanos e ambientais que nortearam a presente pesquisa.

3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DO AU-RMC

A área de estudo (FIGURA 9), denominada de Aglomerado Urbano de Região Metropolitana de Curitiba (AU-RMC), compreende atualmente a mancha urbana da cidade de Curitiba (ao centro) que está conurbada com os municípios limítrofes de Araucária, Fazenda Rio Grande e São José dos Pinhais (ao sul); Piraquara, Pinhais e Quatro Barras (ao leste); Campina Grande do Sul, Colombo, Almirante Tamandaré e Campo Magro (ao norte); e Campo Largo e parte de Araucária (ao oeste).

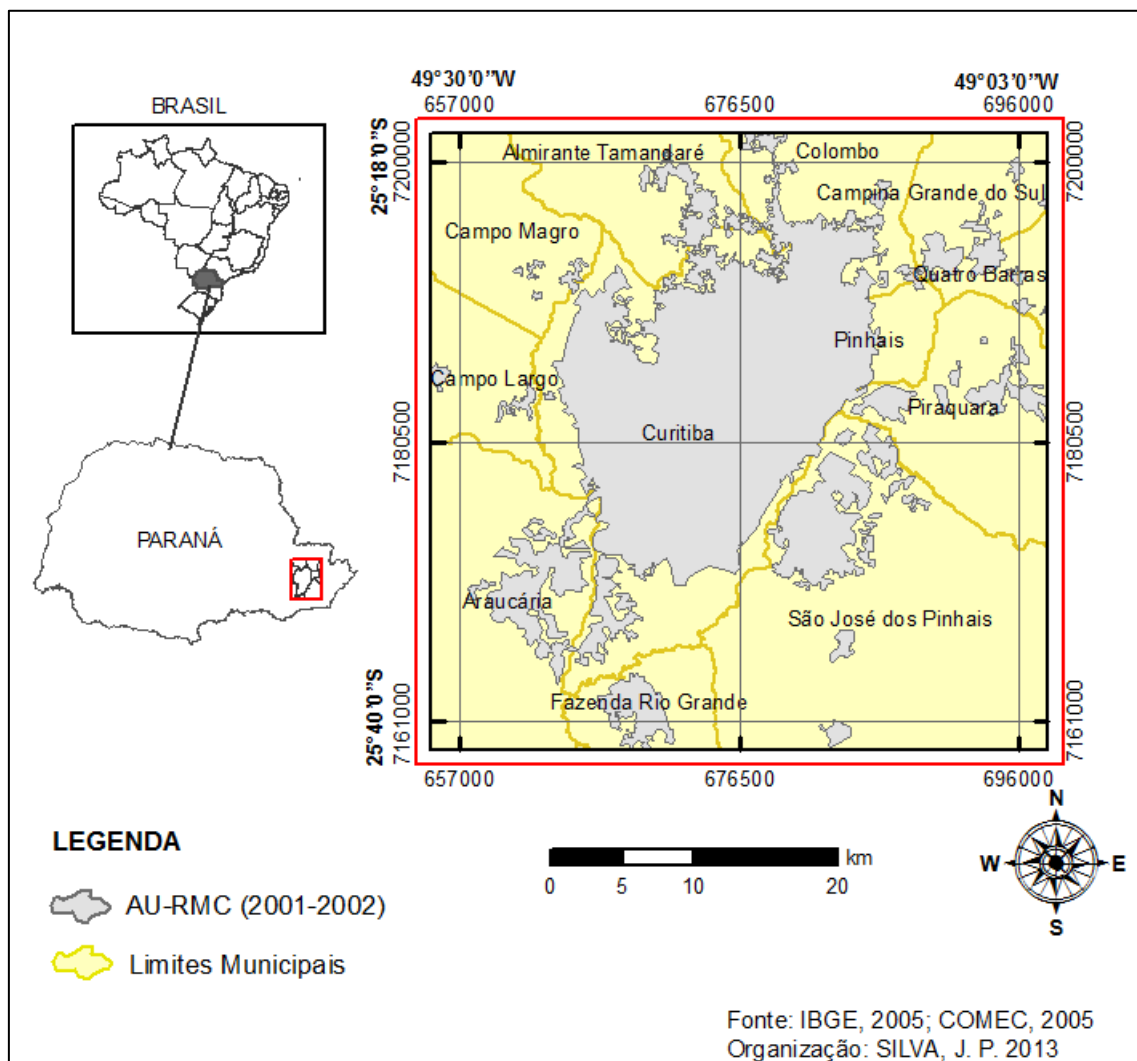


FIGURA 9 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (AU-RMC)

Conforme a FIGURA 9, a área delimitada para este estudo situa-se na porção leste do Estado do Paraná, entre os paralelos 25°18' e 25°40' de latitude sul e entre os meridianos de 48°24' e 48°37' de longitude a oeste de Greenwich.

De acordo com Firkowski (2002), um aglomerado urbano se constitui em uma mancha de ocupação de alta densidade que extrapola os limites do município polo a partir de um processo de conurbação ou periferação que envolve os municípios limítrofes.

Esta área situa-se sobre a bacia hidrográfica do Alto Iguaçu que está compreendida entre a Serra do Mar Paranaense e Escarpa Devoniana.

A maior parcela da AU-RMC, que compreende os municípios de Curitiba, Pinhais, São José dos Pinhais, Fazenda Rio Grande e Araucária possui altitude entre 740 a 950 metros. Na porção norte e noroeste do AU-RMC, onde estão situados os centros urbanos de Campo Magro, Almirante Tamandaré, Colombo e parte do município de Curitiba encontram-se as maiores elevações, entre 950 a 1250 metros (DUMKE, 2007).

Conforme Mendonça e Danni-Oliveira (2007), a localização (latitude) da cidade de Curitiba, caracteriza dias mais longos no verão e dias mais curtos no inverno, o que acentua os efeitos da temperatura do ar durante o ano.

Os fatores regionais são determinantes para as características climáticas da área de estudo, principalmente devido a sua localização entre a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense, bem com, por sua relativa proximidade com o Trópico de Capricórnio (MENDONÇA, 2001).

Conforme a classificação de Koeppen, o AU-RMC situa-se na região climática Cfb definido como clima subtropical (temperado), úmido, mesotérmico, sem estação seca, com verões frescos e invernos com ocorrência de geadas. As mudanças de temperatura no transcorrer dos dias e das estações do ano são resultantes de trocas meridionais dos fluxos de ar que se individualizam nos centros de ação presentes na América do Sul (DANNI-OLIVEIRA, 1999).

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o clima subtropical úmido, no qual o AU-RMC está inserido, é controlado principalmente pelas massas de ar Tropical Atlântica (MTA), Tropical Continental (MTC) e MPA (Polar Atlântica).

As médias térmicas da cidade de Curitiba variam de 12,9°C, no mês mais frio, a 22,5°C, com precipitações médias anuais de até 160 mm. (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Segundo o Mapa das formações Fitogeográfico do Paraná disponível no *website* do Instituto de Terras e Cartografia (ITCG), a porção leste do AU-RMC caracteriza-se originalmente pela ocorrência de Espete Gramínea-Lenhosa (Campos naturais) e na porção oeste a ocorrência da Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária, Mata dos Pinhais).

De acordo com Leal (2012) a cidade de Curitiba em 2010 apresentava 113 milhões m² de áreas verdes. A metodologia empregada para este levantamento considerou os maciços florestais superiores a 100 m².

3.2. A CIDADE DE CURITIBA E A FORMAÇÃO DO AU-RMC

Segundo Pilotto (2010), é entre meados do século XIX e começo do século XX que se forma o espaço urbano de Curitiba. Durante este período é que começaram a se definir os elementos da estrutura intraurbana, ou seja, quando foi possível diferenciar o centro, as áreas residenciais e a formação das futuras áreas industriais. A ausência de obstáculos naturais, como morros, lagos ou oceano, entre outros, facilitou a instalação do sitio inicial de Curitiba que não teve dificuldades em se expandir.

Até o final do século XX, o acesso a Curitiba se dava por duas estradas principais: a da Graciosa que fazia ligação com o litoral, e a do Mato Grosso, ao oeste, caminho que era utilizado pelos tropeiros que ligava Curitiba ao interior do estado. Em 1885, foi inaugurada a estrada de ferro, ligando Curitiba a Ponta Grossa, no interior. A inauguração da ferrovia repercutiu no prolongamento do eixo urbano da cidade de Curitiba (PILOTTO, 2010).

A década de 1930 é marcada como início da trajetória do crescimento urbano industrial, o que encerra a etapa do desenvolvimento primário exportador do Paraná (DESCHAMPS, 2004).

Durante o período de 1900-1950, pode-se dizer que o espaço urbano de Curitiba não sofreu grandes transformações. Neste período destaca-se a construção do primeiro arranha-céu de Curitiba, Edifício Garcez em 1929; a concentração de serviços no centro da cidade; o surgimento dos bairros populares na grande região sul/sudeste de Curitiba e dos municípios vizinhos de Colombo, Piraquara e São José dos Pinhais.

Para a cidade de Curitiba, os acontecimentos mencionados até aqui são principalmente ligados a facilidades e possibilidades de expansão urbana.

A FIGURA 10 apresenta a evolução da expansão urbana da cidade de Curitiba e dos municípios vizinhos pertencentes à RMC de 1953 a 2004.

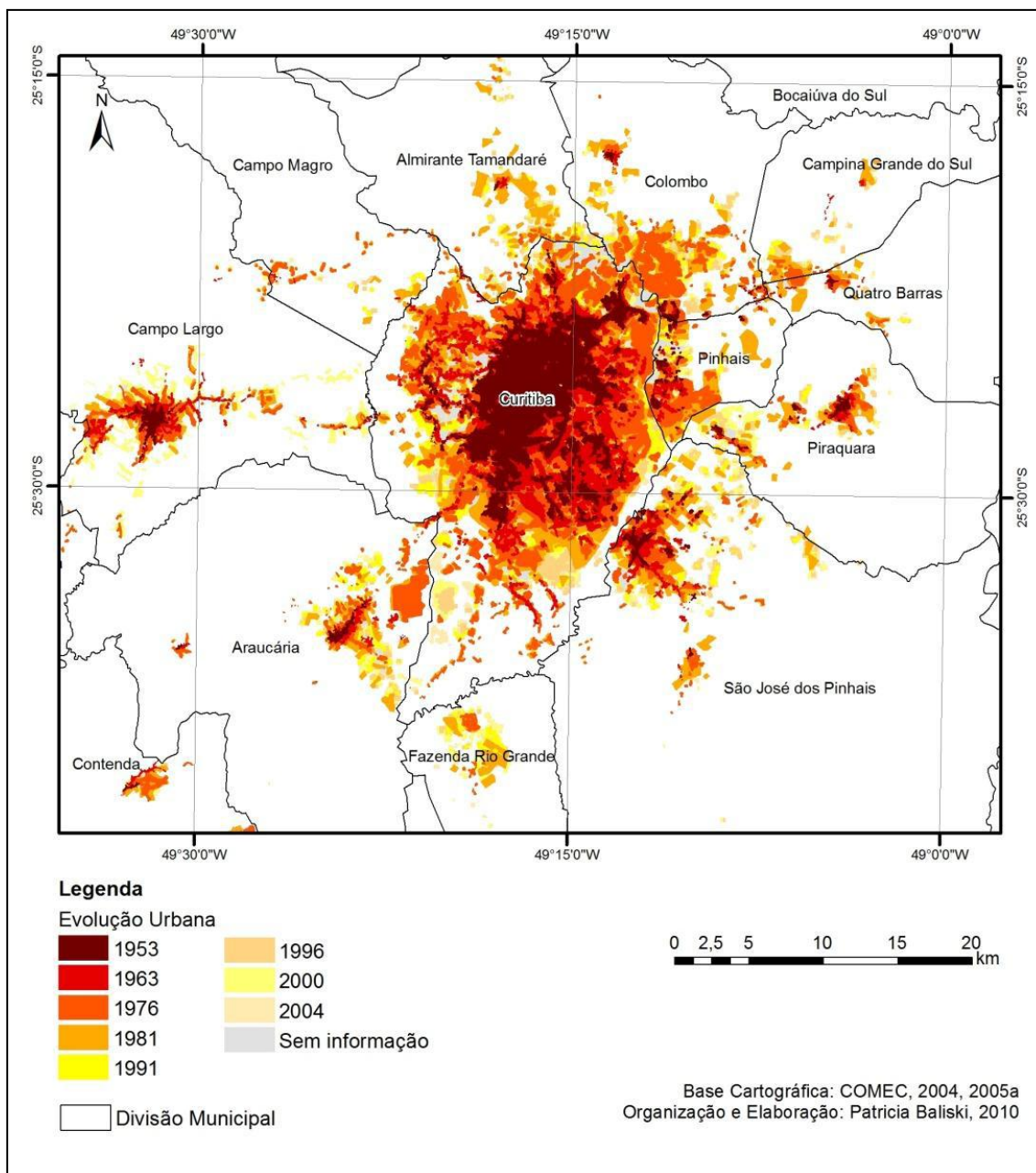


FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DA OCUPAÇÃO URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA (RMC)
FONTE: BALISKI (2011)

Em 1943, a cidade de Curitiba teve sua primeira experiência urbanística, com a contratação do arquiteto francês Alfred Agache para elaboração de seu plano urbanístico. Este arquiteto trazia no currículo a experiência européia de ter participado dos planos diretores de Paris, Dunquerque, Lisboa, entre outros (SCHUSSEL, 2006).

A proposta de Agache previa a divisão da cidade a partir das funções: cívica, residencial, comercial e social, abastecimento, industrial, esportivo, hipódromo, universitário e militar. Para atender estas demandas, propôs a cidade um sistema de circulação com vias circulares e concêntricas.

Segundo Schussel (2006), o plano de Agache estabeleceu o início de uma preocupação com a questão urbanística da cidade. Para este autor, a proposta do arquiteto era que o plano de urbanização deveria prever a expansão em “futuro remoto”, sugerindo a atuação da prefeitura de Curitiba na criação das cidades satélites.

O auge da economia cafeeira do Paraná entre as décadas de 1950 a 1970, e a emancipação política do Paraná no ano 1953, contribuíram para transformações significativas em Curitiba e região. As principais mudanças para este período foram: o crescimento da atividade imobiliária e início do processo de verticalização, o incremento no número de edificações nos municípios limítrofes da cidade de Curitiba, e a construção do centro administrativo, conhecido como Centro Cívico. A mudança do centro administrativo provocou a valorização dos imóveis próximos a esta área, e a construção de uma série de edifícios (PILOTTO, 2010).

Segundo Dechamps (2004) o ano de 1956 caracteriza-se como um importante divisor de águas no processo de metropolização, visto que a implantação do Plano de Metas estabeleceu grandes mudanças na estrutura industrial brasileira, principalmente na integração do mercado e no surgimento dos grandes polos industriais do país.

A partir da década de 1960, segundo Bley¹² (1982, citado por Pilotto 2010), ocorreu uma dilatação espacial do centro da cidade de Curitiba para o sudoeste. Outra grande mudança aconteceu em 1950 com a construção da BR-116, Rodovia Régis Bittencourt (atual Linha Verde).

Segundo dados da COMEC (2006) até o final da década de 1960, a população de Curitiba correspondia a 65% dos habitantes da RMC. Até este período a mancha urbana se restringia aos limites político administrativos de cada município. Em 1964, o plano diretor denominado de Plano Serete, alterou a configuração radial adotada pelo plano Agache para um sistema linear de

¹² BLEY, L. **Percepção do espaço urbano: o centro de Curitiba**. 1982. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Rio Claro.

vias de circulação. Este plano visava organizar o crescimento ao longo de Vias Estruturais Norte e Sul, que foram implantadas em 1974. Em decorrência, a expansão da cidade veio a coincidir com estas vias.

De acordo com Pilloto (2010) é a partir dos anos 1970 que as novas transformações no espaço intraurbano de Curitiba puderam ser verificadas, entre elas: a implantação dos setores industriais; a formação do “novo centro” no Batel; a mudança de localização da área industrial com a criação da cidade industrial de Curitiba (CIC); a formação da metrópole e a conurbação de Curitiba com municípios vizinhos; o crescimento das ocupações irregulares e a consolidação de uma série de centros urbanos aos arredores do centro da cidade de Curitiba.

A TABELA 1 apresenta o crescimento da população que habita os municípios da região metropolitana de Curitiba (RMC).

TABELA 1 - REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA: POPULAÇÃO ABSOLUTA DOS MUNICÍPIOS (1970 A 2010)

MUNICÍPIOS	POPULAÇÃO					
	1970	1980	1991	1996	2000	2010
Adrianópolis	11.540	11.096	8.935	7.339	7.007	6.376
Agudos do Sul	-	5.200	6.076	6.443	7.221	8.270
Almirante Tamandaré	15.299	34.168	66.159	73.018	88.277	103.204
Araucária	17.117	34.799	61.889	76.684	94.258	119.123
Balsa Nova	4.704	5.288	7.515	8.745	10.153	11.300
Bocaiúva do Sul	10.697	12.119	7.788	8.583	9.050	10.987
Campina Grande do Sul	7.891	9.798	19.343	31.444	34.566	38.769
Campo do Tenente	-	-	5241	5700	6335	7.125
Campo Largo	34.405	54.839	72.523	82.972	92.782	112.377
Campo Magro (4)	-	-	-	16.392	20.409	24.843
Cerro Azul	18.363	20.003	16.082	17.107	16.352	16.938
Colombo	19.258	62.881	117.767	153.698	183.329	212.967

continua

Contenda	7.224	7.556	8.941	12.332	13.241	15.891
Curitiba	609.026	1.024.975	1.315.035	1.476.253	1.587.315	1.751.907
Doutor Ulisses	-	-	4.991	5.662	6.003	5.727
Fazenda Rio Grande	-	-	24.997	45.299	62.877	81.675
Itaperuçu	-	-	10.754	17.603	19.344	23.887
Lapa	32.122	35.021	38.027	39.967	41.838	44.932
Mandirituba	11.036	15.452	13.339	15.218	17.540	22.220
Piên	-	-	7745	8.718	9798	11.236
Pinhais	-	-	75.536	89.335	102.985	117.008
Piraquara	21.253	70.640	31.346	52.486	72.886	93.207
Quatro Barras	4.066	5.710	10.007	13.901	16.161	19.851
Quitandinha	10.853	12.391	14.418	14.058	15.272	17.089
Rio Branco do Sul	25.133	31.767	27.542	23.212	29.341	30.650
Rio Negro	-	-	26.315	27.630	28.710	31.274
São José dos Pinhais	34.124	70.634	127.455	169.035	204.316	264.210
Tijucas do Sul	7.848	7.992	10.224	11.559	12.260	14.537
Tunas do Paraná	-	-	2.869	3.426	3.611	6.256
RMC	901.959	1.532.329	2.099.558	2.471.771	2.768.394	3.223.836
RMC sem Curitiba	292.933	507.354	784.523	995.518	1.181.079	1.471.929

FONTE: IPEA (2013)

Após 1970, a população de RMC passou a crescer a índices elevados, conforme mostra a TABELA 1, cerca de 5,78% ao ano, enquanto o índice para o Brasil foi de 2,48%. De acordo esta tabela, os municípios limítrofes de Curitiba (Colombo, São José dos Pinhais, Araucária e Almirante Tamandaré) são os que apresentaram as maiores taxas de crescimento.

Devido a fatores geográficos como a distância com a capital e a remarcação de novas divisas administrativas, alguns municípios apresentaram decréscimo de sua população, como por exemplo, o município de Adrianópolis.

Entre os anos de 1970 e 1980, a implementação de projetos governamentais, principalmente na área industrial (BALISKI, 2011), tendo como

objetivo mudar a matriz produtiva do estado, que neste momento era predominantemente agrícola, ocasionou significativa reestruturação do arranjo metropolitano, alterando assim o grau de inserção econômica e de concentração espacial do parque industrial de alguns municípios limítrofes de Curitiba (MOURA,2009). Em função disso, importantes investimentos foram realizados no aglomerado, em especial nas cidades de Curitiba e Araucária, o que repercutiu na atração de um grande número de imigrantes em busca de oportunidades de trabalho. Ainda neste período, destaca-se a criação da região metropolitana de Curitiba em 1973 e por consequência um ano depois a criação da secretaria chamada Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba, a COMEC, com o objetivo de promover a execução de políticas públicas ligadas ao interesse metropolitano dos municípios.

Segundo COMEC (2006), o Plano de desenvolvimento Integrado da região metropolitana de Curitiba - PDI de 1978 era fundamentado nas seguintes premissas: a) distribuição das atividades econômicas e orientação do processo de expansão urbana em função das vocações e restrições naturais a que estavam submetidos os municípios metropolitanos e b) promoção de um melhor equilíbrio na distribuição das funções econômicas, buscando atenuar os desequilíbrios regionais existentes.

Desta forma, com base nos condicionamentos à ocupação do solo regional e das premissas estabelecidas, vinculou-se a estratégia de ocupação a quatro modos distintos de ação em relação a porções específicas do território metropolitano, definindo-se assim: a porção central formada pelo município de Curitiba, como área de contenção; a porção leste como área de preservação; as porções norte e sul como área de dinamização rural; e a porção oeste como área de promoção industrial e urbana (COMEC, 2006).

Foi no final da década de 1970 que a mancha urbana de Curitiba começou a se expandir para além de seus limites territoriais, passando a constituir uma “única cidade” (ULTRAMARI E MOURA, 1994). Neste processo, Curitiba se conurbou com Colombo, Almirante Tamandaré, ao norte, São José dos Pinhais, a sudeste; Pinhais e Piraquara, a leste, onde se localizam os mananciais de abastecimento da região.

De acordo com Baliski (2011) a expansão da mancha urbana e a conformação de uma aglomeração acentuaram-se nos anos de 1990, quando

investimentos relativos ao setor automobilístico acarretaram a reorientação das instalações industriais. Ainda neste período, houve uma mudança com relação a localização dos edifícios verticais e não residenciais, onde a maior parte dos edifícios comerciais e de serviços passou a ser construídos fora do centro.

Segundo Dumke (2007) o crescimento de Curitiba se deu tanto vertical como arealmente, extrapolando assim aos limites municipais. É neste crescimento de ocupação espacial e demográfica, que delineou a forma de mancha que se constitui o aglomerado urbano atual. Destaca-se que o aglomerado urbano não deve ser confundido com aglomerado metropolitano, uma vez que o primeiro se configura como uma mancha urbana contínua, e o segundo se configura como um território extenso e muito heterogêneo constituído pelos municípios limítrofes (ULTRAMARI e MOURA, 1994).

Foi durante a década de 1990 em que se instalaram os grandes shoppings centers em Curitiba (FIRKOWSKI, 2009). A localização da maior parte dos shoppings de Curitiba neste período, especialmente aqueles destinados a camadas de alta renda, foi predominante no setor oeste/sudoeste da cidade. Neste período também surgem novas áreas e formas de moradia das camadas de alta renda, como destaque a região do Ecoville em Curitiba e por fim o condomínio fechado Alphaville localizado em Pinhais.

Segundo Firkowski (2002), durante este mesmo período ocorreu uma descentralização do setor industrial que nos anos 1970 e 1980 estava concentrado na CIC e em Araucária (ao sul/sudoeste), ocasionado pela implantação da indústria automobilística, que promoveu de tal modo uma maior tendência de ocupação da região leste/sudeste da RMC.

Schussel (2006) constatou que o crescimento direcionado dos vetores viários regionais e nacionais avançou sobre as áreas de mananciais da RMC criando assim um conflito entre as áreas de proteção ambiental para abastecimento e ocupação humana. Isso acaba repercutindo também em um maior adensamento urbano, valorização do solo e verticalização predial.

Atualmente a mancha urbana, ou seja, o AU-RMC delimitado na cor laranja na FIGURA 11 compreende o município de Curitiba, localizado no centro, e parte dos municípios de Almirante Tamandaré, Araucária, Campina Grande do Sul, Campo Largo, Campo Magro, Colombo, Fazenda Rio Grande, Pinhais, Piraquara, São José dos Pinhais e Quatro Barras.

A área do AU-RMC é de 1.051,31 km², ou seja, 8,1% do território da Região Metropolitana, com 13.040,76 km² (COMEC, 2006).

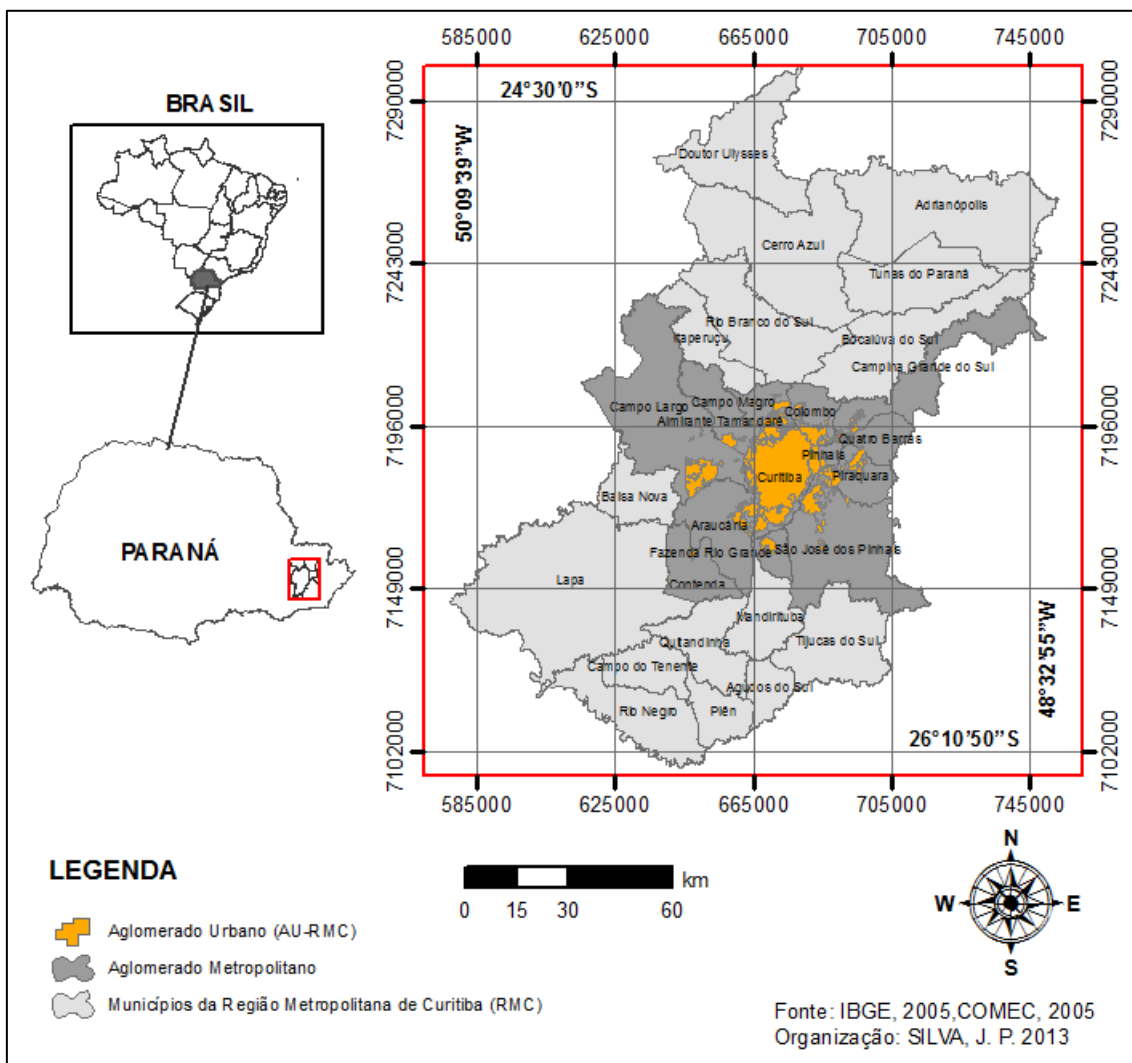


FIGURA 11 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA (RMC)

Segundo dados do Plano de desenvolvimento Integrado da região metropolitana de Curitiba – PDI elaborado por COMEC (2006) a população da RMC, a qual foi estimada em 3.364.615 em 2010, passará para 4.002.283 habitantes em 2020. Com crescimento a cerca 2,58%, esta taxa deverá continuar a ocorrer na área metropolitana, estendendo e adensando ainda mais o espaço que compreende a área conurbada dos municípios limítrofes de Curitiba.

Conforme este mesmo documento, dentre as propostas elaboradas para o desenvolvimento da RMC, não existe nenhuma consideração explícita a

respeito do campo térmico produzido do AU-RMC, o que retrata a falta de preocupação ou desconhecimento por parte da gestão pública que privilegie um planejamento territorial que contemple de forma integrada e apropriada os aspectos naturais e construídos, com vistas aos variados intempéries climáticos produzidos localmente que são amplamente discutidos na climatologia geográfica por (LOMBARDO, 1985; OKE 1987; MENDONÇA, 1994; DANNI-OLIVEIRA, 2000).

Dumke (2007) aponta que as adaptações que sucederam o Plano Serete durante 25 anos incluíram o abandono do conceito de Cidade-Jardim, a maciça verticalização ao longo dos eixos estruturais e o adensamento da população em vias rápidas, as quais atendiam a uma forte especulação imobiliária, repercutindo no surgimento de novos microclimas na cidade de Curitiba.

Diante destas modificações, Danni-Oliveira (1999) observou que os corredores formados pelos edifícios ao longo dos eixos estruturais da cidade de Curitiba ora canalizam os ventos, ora atuam como barreiras à livre circulação do ar, não favorecendo assim a dispersão dos poluentes atmosféricos. Para esta autora, os eixos estruturais, impõe uma topografia edificada que propicia a criação de campos térmicos diferenciados e a formação de verdadeiros cânions urbanos.

Rossi (2005), ao analisar a influência da ocupação do solo na variação de temperatura em diferentes localidades da cidade de Curitiba, observou o aquecimento de 0,6°C no período de 30 anos. Essa autora, argumenta que a urbanização e as atividades antrópicas podem ter contribuído no incremento da temperatura local dos bairros do Cajuru e Mercês.

Nota-se que o atual modelo de gestão pública, a dinâmica climática é apenas atrelada as condições geográficas impostas pela natureza. É diante desta perspectiva que a realização deste trabalho é motivada, pois permite avaliar e validar o campo térmico produzido pela superfície no espaço intraurbano.

Conforme exposto neste capítulo, as intervenções sociais, políticas e econômicas vieram a delinear o espaço urbano da RMC de forma acelerada a partir da década de 1970. Como repercussão, houve uma remodelagem dos gradientes térmicos de superfície do AU-RMC que são paralelos à redução da vegetação observada por Vieira (2006) para a cidade de Curitiba durante os

anos de 1986 e 2004 e pelo aumento do uso de material construtivo para as novas áreas industriais e residenciais apontadas por Firkwoski (2002) e Baliski (2010), principalmente nas regiões periféricas da cidade de Curitiba.

Neste capítulo, procurou-se buscar a partir da formação da cidade polo os elementos que vieram contribuir para o entendimento dos principais condicionantes estruturais que influenciaram no crescimento e delimitação do AU-RMC, fornecendo desta maneira subsídios para análise cobertura da superfície urbana numa perspectiva temporal.

4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos que foram utilizados para o desenvolvimento desta dissertação, conforme o referencial teórico e dados disponíveis.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Bases Cartográficas

Para elaboração do material cartográfico foram utilizados os arquivos digitais descritos no QUADRO 8:

Nome	Formato	Fonte
Mancha Urbana	<i>Shapefile</i>	COMEC, 2005
Evolução do crescimento da população da RMC	<i>Shapefile</i>	COMEC, 2006
Arruamento e Bairros de Curitiba	<i>Shapefile</i>	IPPUC, 2012
Drenagem da bacia do Alto Iguaçu	<i>Shapefile</i>	ITCG, 2012
Limite dos municípios do Paraná	<i>Shapefile</i>	ITCG, 2012
Uso do Solo da bacia do Alto Iguaçu	<i>Shapefile</i>	Águas Paraná, 2012

QUADRO 3 - BASE DE ARQUIVOS ESPACIAIS UTILIZADOS PARA O ESTUDO

As bases cartográficas foram utilizadas para delimitação da área de estudo, elaboração dos cartogramas de localização e dos mapas temáticos, bem como para auxiliar nas análises dos resultados.

Dentre estes arquivos alguns não tinham os metadados preenchidos, logo, foram adotadas as datas de aquisição do dado conforme a consulta no endereço eletrônico da instituição detentora da informação espacial.

4.1.2. Imagens Orbitais

Para a análise da superfície terrestre foram empregadas as imagens TM/Landsat-5 obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponíveis no catálogo eletrônico desta mesma instituição, que estão organizadas no QUADRO 5.

Data da Passagem	Revolução	Horário GMT	Azimute do Sol	Elevação do Sol
06/05/1985	6274	12:41:28	44.3444	34.3535
30/11/1985	9302	12:39:35	89.9017	57.3361
15/07/1993	49844	12:33:44	43.9465	27.8526
04/11/1993	51475	12:33:22	79.4004	54.9719
31/05/2000	86429	12:47:23	39.2617	30.7947
22/10/2000	88526	12:49:59	69.6487	56.4122
01/08/2005	13922	12:59:15	41.3818	34.3286
21/11/2005	15554	12:59:52	83.6254	62.0059
31/08/2010	40951	13:01:36	47.0715	42.7358
19/11/2010	42116	13:01:07	82.31	62.2438

QUADRO 4 - RELAÇÃO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5 UTILIZADAS
 FONTE: INPE (2012), Organizado pelo autor

4.1.3. Equipamentos e Softwares

Para a realização das medições da TS e da TA durante as atividades de campo foram utilizados dois termômetros infravermelhos MT-350 para medição da TS e dois termômetros digitais modelo HT-208 para medição da TA.

Para as etapas de processamento digital das imagens TM/Landsat-5 foi empregado o software ENVI 4.8 (EXCELIS).

Para elaboração dos mapas temáticos e cartogramas de localização foi utilizado software ArcGIS 9.3.1 (ESRI)

O software Google Earth Pro foi utilizado para análise da superfície para os anos de 2005 a 2010.

4.1.4. Dados das Estações Meteorológicas de Curitiba e Pinhais /PR

Para subsidiar a pesquisa da TS do AU-RMC foram utilizados dados meteorológicos das instituições descritas a seguir:

Instituição: Instituto Paranaense de Agronomia de Paraná (IAPAR)

Dados: Temperatura de bulbo seco, Temperatura do bulbo úmido, Umidade relativa; Precipitação acumulada para o dia.

Período: 01/05/1985 a 15/07/1993

Localização da Estação: Fazenda Canguiri, Pinhais /PR

Instituição: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Dados: Temperatura de bulbo seco, Temperatura do bulbo úmido, Temperatura Instantânea, Umidade relativa, Precipitação e Pressão.

Período: 01/05/1985 a 15/07/1993

Localização da Estação: Campus Centro Politécnico da UFPR, Curitiba/PR

Instituição: Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR)

Dados: Temperatura do ar, Umidade relativa; Precipitação e Pressão.

Período: 28/05/2000 a 19/11/2010

Localização das Estações: Campus Centro Politécnico da UFPR, Curitiba/PR; e Fazenda Canguiri, Pinhais /PR

4.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para mensurar a condição térmica da superfície do AU-RMC para os períodos de inverno e verão de 1985, 1993, 2000, 2005 e 2010, optou-se por utilizar as imagens do infravermelho termal, banda seis (6) do sensor TM/Landsat-5, a qual capta a radiação emitida em ondas longas pela superfície terrestre.

Dentre os sensores termais disponíveis, discutidos no Capítulo 2.2, adotou-se o sensor TM/Landsat-5 visto que este possibilita a análise da TS da área de estudo dentro de uma escala histórica de passagem compatível com a proposta desta pesquisa. Além disso, este sensor possui uma resolução espacial de médio detalhe (120x120m), que segundo Collischonn (1998), é apropriada para estudo intraurbano.

Para distinguir os diferentes usos da superfície do AU-RMC, os quais armazenam calor de forma diferenciada de acordo com as características dos materiais e seu tempo de exposição aos raios solares, optou-se em utilizar o modelo NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) que pode ser gerado pelas bandas 3 e 4 do TM/Landat-5.

O roteiro metodológico do presente estudo foi organizado em três fases, detalhadas a seguir:

A primeira fase compreende a delimitação da problemática e dos objetivos bem como pela definição dos métodos a serem adotados com base na revisão bibliográfica.

A escolha do AU-RMC foi motivada pela disponibilidade de dados meteorológicos e imagens de satélite Landsat-5 para todo o período a ser analisado. Além disso, a área de estudo possui um extenso referencial teórico a respeito de estudos climáticos, como exemplo, Danni-Oliveira (1999), Rossi (2005), Dumke (2007); Leal (2012), entre outros, e diversos trabalhos que discutem o processo de formação do AU-RMC, como exemplo, Firkowski (2002), Moura (2009), Pilotto (2010) e Baliski (2011), entre outros, que subsidiaram a aplicação da metodologia dentro de perspectiva temporal.

Para atender os objetivos propostos, a segunda fase foi subdividida em quatro blocos que ocorreram de forma paralela e são descritos a seguir:

O primeiro bloco refere-se a todas as etapas de processamento digital das imagens TM/Landsat-5 e cartografia temática.

O segundo bloco refere-se ao trabalho de campo para obtenção dos valores de TS e TA sobre diferentes condições de cobertura e insolação.

O terceiro bloco consiste na sistematização dos dados das condições atmosféricas a partir das estações meteorológicas de Curitiba e Pinhais para subsidiar as TS obtidas pelo canal térmico do sensor TM/Landsat-5.

O quarto bloco que compreende a revisão bibliográfica sobre o processo de formação do AU-RMC e caracterização física da área de estudo a qual foi descrita no Capítulo 3.

Por fim, a terceira fase, compreende a análise dos resultados obtidos pelos procedimentos realizados na segunda fase, buscando relacionar as causas e efeitos causados pela mudança da cobertura da superfície e sua relação com TS numa perspectiva espaço-temporal.

A FIGURA 12 ilustra a organização das três fases deste estudo e a síntese dos procedimentos metodológicos empregados para esta pesquisa.

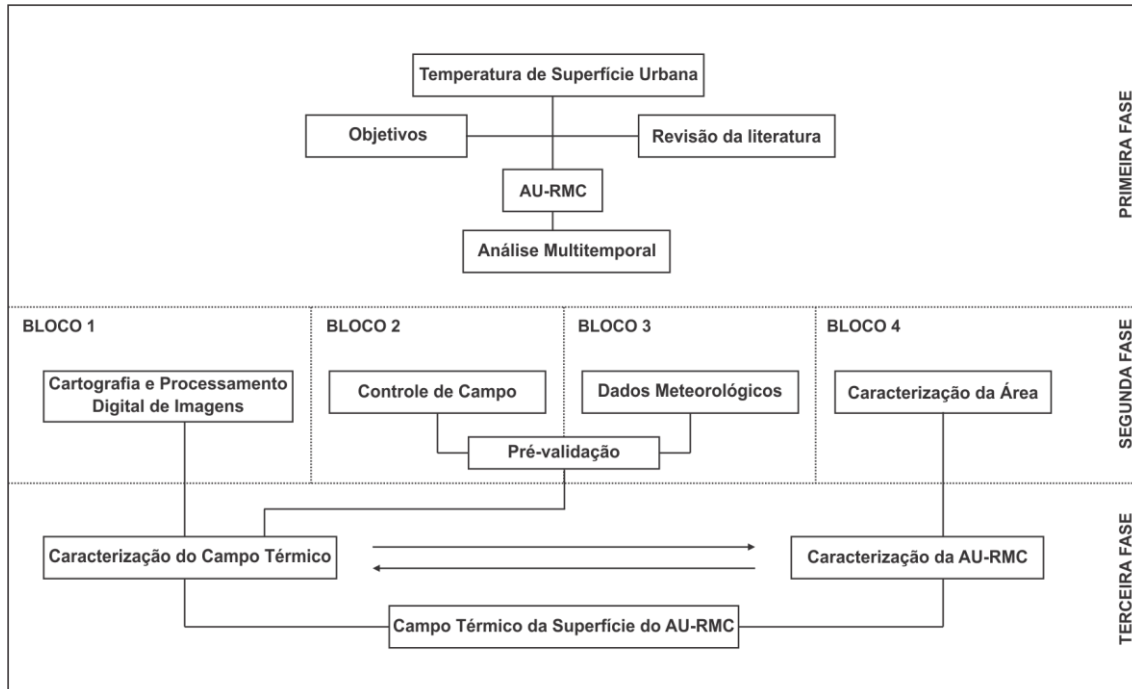


FIGURA 12 – SÍNTESE DO ROTEIRO METODOLÓGICO

4.2.1. Processamento Digital e Cartografia (BLOCO 1)

A FIGURA 13 apresenta o fluxograma das atividades de Cartografia e Processamento Digital realizadas no Primeiro Bloco da Segunda Fase.

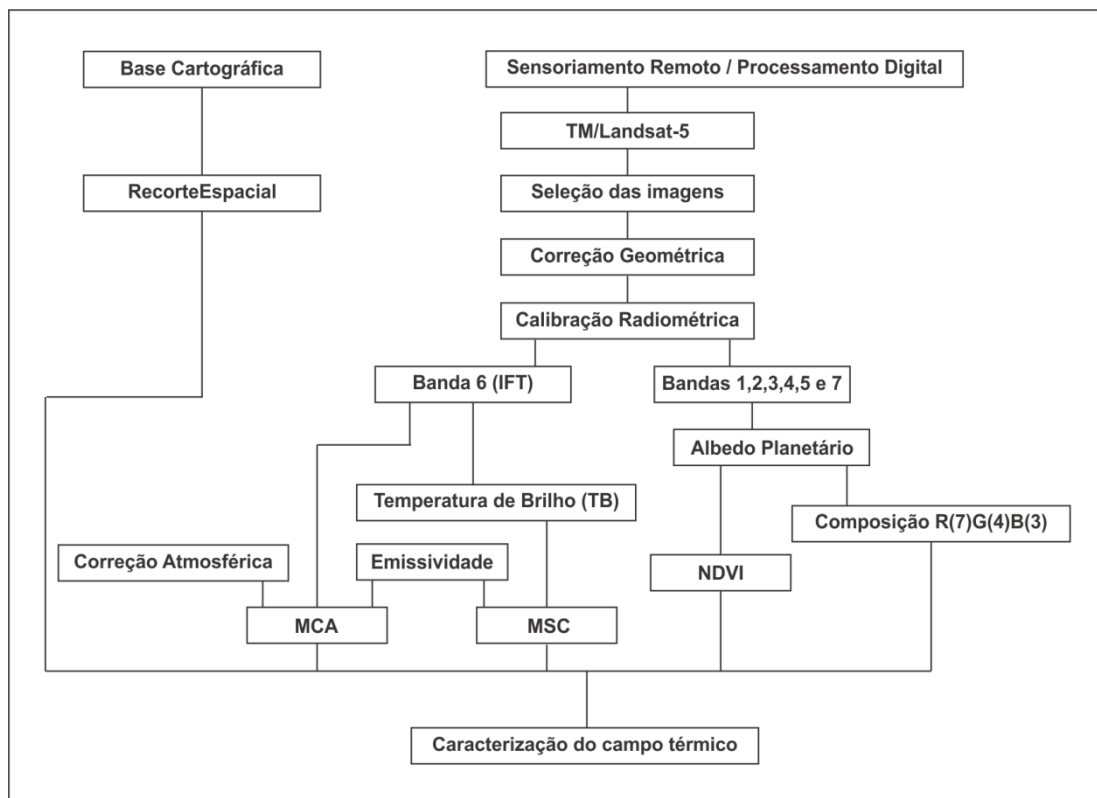


FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE CARTOGRAFIA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO TÉRMICO

4.2.1.1. Procedimento para seleção das imagens de satélite Landsat-5

A seleção das cenas da área de estudo que correspondem à órbita 220, ponto 78, descritas no QUADRO 5, empregadas para a análise da evolução temporal e identificação das ilhas de calor de superfície (ICS) do AU-RMC seguiram os critérios abaixo:

- a) Disponibilidade temporal em intervalos de pelo menos sete anos;

- b) A menor quantidade de cobertura de nuvens possível ou que não influenciasse a análise sobre a área do AU-RMC;
- c) A disponibilidade de cenas com duas datas para o mesmo ano ou de anos seqüentes com características climáticas distintas, ou seja, uma próxima do verão e a outra próxima do inverno, privilegiando desta forma diferentes condições de iluminação terrestre conforme o dia da passagem do satélite Landsat-5.

Desta maneira, foi possível um comparativo e análise dos valores de emissão (térmica) da superfície captada pelo sensor infravermelho termal (banda 6) com os valores de reflectância captados pelas bandas da faixa do visível e do infravermelho próximo para a caracterização da cobertura da superfície.

Entretanto, devido à baixa disponibilidade de imagens (cenas) que contemplassem todo o período proposto para análise da TS, algumas imagens com falhas de aquisição ou presença de nuvens foram utilizadas. Mesmo assim, estas não comprometeram significativamente os resultados da área delimitada para análise.

Conforme anteriormente citado por Baliski (2011) os efeitos de conurbação foram intensificados durante o período de 1990. Sendo assim, o recorte espacial utilizado não contempla a evolução das dimensões do aglomerado urbano para os diferentes períodos analisados, e desta forma, será utilizado apenas uma única delimitação como referência para facilitar a leitura e evitar um excesso de nomenclaturas.

Neste sentido, foi selecionado como recorte espacial do aglomerado urbano do período (2001-2002) elaborado por COMEC (2006), a fim de se obter uma área padrão de estudo para os diferentes períodos estudados. Todavia, a delimitação adotada do AU-RMC, ou seja, a mancha urbana conurbada da área de estudo permanece fiel até quando sobreposta às imagens de satélites atuais.

Ressalta-se que, não foi possível realizar nenhuma campanha de campo para comparar a TS estimada pela banda 6 do sensor TM/Landsat-5 com a temperatura *in loco* durante a sua passagem devido um repentino desligamento do satélite Landsat-5 no mês de novembro de 2011, motivado por problemas

técnicos. Sendo assim, foram empregadas somente imagens de catálogo sem controle de campo simultâneo.

4.2.1.2. Procedimento de correção geométrica

Esta etapa consistiu no processo de georreferenciamento das sete bandas do TM/Landsat-5. Para isso, fez uso do software de ENVI 4.8 (EXCELIS) e uma imagem ETM/Landsat-7 ortorretificada do ano de 2005 obtida no *website* da Global Visualization Viewer mantido pela *United States Geological Survey* (USGS).

4.2.1.3. Procedimento de calibração radiométrica

Segundo Chander *et al.* (2009) o procedimento de calibração radiométrica, ou cálculo de radiância, é um passo fundamental para converter os dados da imagem em uma escala radiométrica comum fisicamente significativa.

Este processo consiste na conversão do número digital (DN), valor atribuído a cada pixel da imagem, em radiância espectral monocromática.

Durante a calibração, os valores dos pixels são convertidos em unidades espectrais absolutas. Para os sensores TM, a calibração radiométrica envolve o redimensionamento dos números digitais brutos em números digitais calibrados conforme os coeficientes de correção após o lançamento do satélite, que são atualizadas sistematicamente.

Para a calibração das bandas do sensor TM foram utilizados os coeficientes descritos no QUADRO 6 revisados por Chander *et al.*(2009).

Calibração do sensor TM (Qcalmin = 1 and Qcalmax = 255)							
Bandas	Spectral Range	Center wavelengh	LMINy	LMAXy	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	$ESUN_{\lambda}$
Unidades	μm		$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$		$(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m} / \text{DN})$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
1	0,452 – 0,518	0,485	-1,52	169	0,671339	-2,19	1983
2	0,528 – 0,609	0,569	-2,84	333	1,322205	-4,16	1796
3	0,626 – 0,693	0,660	-1,17	264	1,043976	-2,21	1536
4	0,776 – 0,904	0,840	-1,51	221	0,876024	-2,39	1031
5	1,567 – 1,784	1,676	-0,37	30,2	0,120354	-0,49	220,0
6	10,45 – 12,42	11,435	1,2378	15,3032	0,055376	1,18	N/A
7	2,097 – 2,349	2,223	-0,15	16,5	0,065551	-0,22	83,44

QUADRO 5 - COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA PARA OS SENSORES TM/LANDSAT-5

FONTE: CHANDER *et al.* (2009)

A calibração radiométrica pode ser realizada pela Equação (4) :

$$L_{\lambda} = (G_{rescale} * Q_{cal}) + B_{rescale} \quad (4)$$

Onde:

L_{λ} = é radiância em unidade de $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$;

$G_{rescale}$ = é o fator de ganho de redimensionamento específico da banda ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}) \text{DN}$;

Q_{cal} = é o valor do pixel (Número Digital);

$B_{rescale}$ (Offset) = Fator de Perda de redimensionamento específico da banda $W/(m^2.sr.\mu m)$;

4.2.1.4. Procedimento para correção do Albedo Planetário

Uma redução na variabilidade das cenas em diferentes períodos pode ser adquirida utilizando o cálculo do Albedo Planetário ou Topo de atmosfera (Top-of-atmosphere).

Segundo Chander *et al.*, (2009), ao comparar imagens provenientes de diferentes períodos, há três vantagens em usar esta correção:

Em primeiro lugar ela remove o efeito do cosseno dos diferentes ângulos zenitais solares.

Em segundo lugar, esta correção compensa os diferentes valores de radiação solar exoatmosféricos decorrente das diferenças entre as bandas espectrais.

Em terceiro lugar, corrige a variação da distância Terra-Sol entre a aquisição de dados em diferentes datas.

Essas variações podem ser significativas geograficamente e temporalmente. Este processo é descrito pela Equação (5):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi.L_{\lambda}.d^2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{λ} = radiância corrigida dos efeitos do Albedo planetário;

d = é a distância da Terra-Sol, em unidades astronômicas;

L_{λ} = é a radiância em unidade em $W/(m^2.sr.\mu m)$;

π = Constante matemática igual a ~ 3.14159 (sem unidade);

$ESUN_{\lambda}$ = é a Irradiância Solar em $W/(m^2.sr.\mu m)$;

θ = é a elevação do Sol em graus;

Salienta-se que este procedimento não é aplicado na banda 6 do sensor TM/Landsat-5, uma vez que este sensor térmico capta os comprimentos de onda emitidos e não os refletidos.

4.2.1.5. Procedimento para obtenção da Temperatura de Brilho

Depois de convertidos em radiância espectral, as cenas provenientes da banda térmica são convertidas para Temperatura de Brilho (TB). A temperatura do sensor de luminosidade assume que a superfície da Terra é um corpo negro (emissividade igual a 1) já discutido anteriormente, e inclui os efeitos atmosféricos de absorção e emissão (CHANDER *et al.*,2009). Para tanto, admite-se as constantes de pré-calibração, descritas no QUADRO 7.

Sensor	K1 ($W/(m^2.sr.\mu m)$)	K2 (Kelvin)
Ladnsat-4 TM	671.62	1284.30
Landsat-5 TM	607.76	1260.56
Landsat-7 ETM+	666.09	1282.71

QUADRO 6 - CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO PARA OS SENSORES TÉRMICOS DAS SÉRIES LANDSAT TM E ETM
 FONTE: CHANDER *et al.* (2009)

Destaca-se nesta etapa que, o procedimento 4.1.3 (calibração da radiância), refere-se à calibração de pós-lançado. Essa medida é adota para correção dos efeitos atmosféricos já apresentados e a redução dos erros ocasionados pela depreciação dos sensores ao longo dos anos.

A Equação (6) descreve o modelo de conversão de radiância espectral para temperatura de brilho (T_b):

$$T_b = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (6)$$

onde:

T_b = é a temperatura de brilho;

$K2$ = é a constante de calibração de pré-lançamento (Kelvin);

$K1$ = é a constante de calibração de pré-lançamento em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$;

L_λ = é a radiância em unidade em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$;

\ln = é o logaritmo natural;

4.2.1.6. Procedimento para obtenção da Temperatura de Superfície

Para obtenção da temperatura de superfície optou-se em utilizar a equação inversa de Planck inicialmente proposta por Artis e Carnahan ¹³(1992) a qual foi empregada por Nichol (1994) e Collischonn (1998).

A equação (7) descreve o modelo para obtenção da temperatura de superfície (TS):

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda_6 T_b}{a}\right) \ln \varepsilon} \quad (7)$$

¹³ ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W.H. **Survey of emissivity variability in thermography of urban áreas.** *Remote Sensing of Environment*, v. 12, n.4, p.313-329, Sept. 1982.

Onde:

T_s = é a temperatura da superfície;

T_b = é a temperatura de brilho do sensor termal;

λ_6 = comprimento de onda médio da radiação da banda 6 (11,435 μm);

a = hc/σ (1.438×10^{-2} mK);

$\ln \varepsilon$ = Logaritmo natural da emissividade da superfície;

Sendo que:

h = é a constante de Planck (6.28×10^{-34} J/seg);

c = é a velocidade da luz (2.998×10^8 m/seg);

σ = é a constante de Stefan-Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K);

Como já discutido na revisão da literatura, a obtenção da TS envolve uma complexidade extensa de correções (NICHOL, 1994; VOOGT e OKE, QIN *et al.*, 2001; 2003; WENG, 2004, 2009; SOUZA, 2008), que na maioria dos casos é de difícil aplicação.

A escolha da Equação (6) foi motivada por esta permitir a inserção da variável emissividade da superfície no seu computo. Para tanto, neste trabalho o valor da emissividade foi estipulada para toda imagem como área não vegetada (0,92), proposta inicialmente por Nichol (1994) e adotado por Collischonn (1998) e Steinke (2004).

Para superfícies vegetadas, Collischonn (1998) adotou o valor de emissividade de 0,95. Para este estudo, foi adotado somente o valor de 0,92 para a emissividade, uma vez que a área delimitada é constituída principalmente por materiais urbanos com diferentes usos e densidades de materiais com baixa emissividade (concreto e asfalto).

Outra consideração importante é que a emissividade da vegetação varia muito em relação à espécie, densidade, estágio de crescimento e período do ano (MOREIRA, 2007; NOVO, 2009).

Ressalta-se que o procedimento adotado neste trabalho para obtenção da TS não contempla uma etapa de correção atmosférica.

Desta maneira, adotou-se a sigla MSC (Método Sem Correção Atmosférica) para este procedimento no transcorrer deste trabalho.

4.2.1.7. Geração do NDVI

Devido à complexidade de diferentes formas de uso e densidade dentro dos diferentes níveis de ocupação urbana (baixa, média, alta e vertical) além de áreas verdes no AU-RMC, somados a dificuldade em estabelecer uma classificação compatível do uso do solo para atender os diferentes períodos analisados, adotou-se para subsidiar a análise da emissão e reflectância da superfície, tendo em vista os diferentes níveis de emissividade da mesma, o modelo *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Este modelo de mistura espectral permite indicar, de forma numérica, se o alvo observado contém ou não vegetação verde e qual sua intensidade de área.

O princípio físico do NDVI consiste no fato de que a vegetação verde com vida absorve fortemente a radiação solar na região do vermelho ($0,6 \mu\text{m}$) para realizar o processo de fotossíntese. Por outro lado, as células das plantas refletem fortemente na região do infravermelho próximo ($0,8 \mu\text{m}$).

A adoção deste procedimento é justificada uma vez que permite identificar pelo uso do sensor remoto as áreas que apresentam índices vegetativos representativos, ou seja, para o emprego da análise da TS, possibilita a identificação das áreas que possuem baixo valor de emissão termal em relação às áreas construídas. Outra vantagem para o emprego do NDVI é a simplicidade da sua fórmula, que consiste na diferença normalizada pela soma das duas reflectâncias, que são representadas pelo intervalo de menos um (-1), o qual admite-se a ausência de vegetação, e mais um (+1) onde ocorre a maior intensidade da vegetação. O intervalo entre -1 e +1, correspondem a combinações de material construtivo, solo exposto, áreas de campo com vegetação de pequeno a médio porte.

A equação para obtenção do NDVI no sensor TM/Landsat-5 é descrita a seguir:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (8)$$

Onde:

ρ_4 = é a radiância do infravermelho próxima (banda 4);

ρ_3 = é a radiância do vermelho (banda 3);

Na literatura consultada, Van de Griend e Owe (1993), Collischonn (1998), Souza (2008) e Moreira (2009) utilizaram o NDVI para obtenção da emissividade da superfície.

Weng *et al.*(2004) encontraram correlação linear negativa entre os valores das temperaturas mais elevadas e cobertura vegetal do NDVI para a cidade de Indianápolis/EUA. Porém, este método requer atenção para estimativa da emissividade da superfície devido ao ciclo sazonal da vegetação que modifica o sinal captado pelo sensor remoto (WENG, 2009).

Com base na constatação deste autor, o emprego do NDVI neste trabalho tem como objetivo subsidiar a análise do comportamento da superfície em relação ao seu grau de urbanização e destacar a presença dos níveis de vegetação para as diferentes datas analisadas. Portanto, este parâmetro não foi adicionado ao cálculo de estimativa da TS, sendo empregado somente para elaboração do mapa da intensidade da vegetação da área de estudo, permitindo assim sua interpretação visual e comparação com o mapeamento da superfície térmica do AU-RMC.

4.2.1.8. Aplicação da Correção Atmosférica para o dia 19/11/2010

Conforme discutido na revisão bibliográfica, um ponto que recebe destaque para melhoramento dos valores da TS obtidos por sensoriamento remoto consiste na adoção da correção atmosférica.

Uma das grandes dificuldades para esta etapa é a disponibilidade de dados atmosféricos que podem ser obtidos por radiossondas ou por modelos de calibração radiométrica do próprio sensor.

Para sanar a ausência destes dados, existem diferentes modelos empíricos de correção atmosférica como os propostos por (QIN *et al.*, 2001; JIMÉNEZ-MUNÓZ e SOBRINO, 2003; SOUZA, 2008) para imagens térmicas do sensor TM/Landsat-5. Nestes modelos, os efeitos atmosféricos são minimizados com base nas informações da rede regular de estações meteorológicas, evitando deste modo, a utilização de radiossondas e modelos de transferência radioativa.

Para obtenção dos parâmetros necessários para correção atmosférica da TS para o AU-RMC, optou-se neste trabalho em utilizar a Calculadora de Correção Atmosférica (WEBCALC) elaborada por Barsi *et al.*, (2003), a qual está disponível online pelo endereço eletrônico <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. Esta aplicação *Web* emprega em seu algoritmo as rotinas de processamento do modelo radiativo MODTRAN 4.0.

Para geração dos parâmetros de correção atmosférica (transmissão atmosférica, radiância emitida e recebida) a partir da WEBCALC são necessárias as seguintes informações de entrada para este sistema: a) data e horário da passagem do sensor; b) escolha do perfil atmosférico para estação de verão ou inverno, c) latitude e longitude da área.

Além destes dados, para obtenção de melhores resultados das condições atmosféricas, o modelo possibilita a entrada de dados referentes à superfície no momento da passagem do satélite, como a Altitude (Km), Pressão (mb), Temperatura do ar (°C) e Umidade Relativa (%).

Devido a problemas técnicos do ambiente WEBCALC para envio dos dados processados ao usuário solicitante, mencionados no próprio website até data de elaboração deste capítulo, e pela falta de dados meteorológicos

coletados no momento da passagem do sensor TM/Landsat-5, para esta etapa foi utilizado apenas à imagem referente à passagem do dia 19/11/2010 para análise do comportamento TS no AU-RMC.

Os parâmetros das condições meteorológicas do dia 19/11/2010 foram obtidos junto ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).

Outra limitação da WEBCALC é que este sistema só processa imagens térmicas do sensor TM/Landsat-5 a partir do dia 19 de janeiro de 2000.

A equação (9) descreve a etapa para correção atmosférica adotada por Coll *et al.* (2010):

$$CV_R = \frac{L_\lambda - L \uparrow}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L \downarrow \quad (9)$$

Onde:

CV_R = radiância com correção atmosférica;

L_λ = é o valor da radiância do sensor;

$L \uparrow$ = radiação emitida pela superfície;

$L \downarrow$ = radiação em ondas longas que atinge a superfície;

τ = transmissividade da atmosfera;

ε = emissividade da superfície;

Os valores recebidos por e-mail com os resultados do processamento da WEBCALC e adotados na Equação (9) são descritos abaixo:

$$L \uparrow = 1.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m});$$

$$L \downarrow = 1.19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m});$$

$$\tau = 0.85 ;$$

Para emissividade (ε) foi adotado o valor 0,92.

O método para estimativa da TS para esta etapa corresponde ao inverso da lei de Planck proposto por Coll *et al.*(2010), descrito a seguir:

$$T_S = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{CV_R} + 1\right)} \quad (9)$$

Onde:

T_S = é a temperatura da superfície;

$K2$ = é a constante de calibração de pré-lançamento (Kelvin);

$K1$ = é a constante de calibração de pré-lançamento em $W/(m^2 \cdot \mu m)$;

CV_R = é a radiância com correção atmosférica;

Para este método, adotou-se a sigla MCA (Método Com Correção Atmosférica) no transcorrer deste trabalho.

4.2.2. Coleta de Dados de Campo (BLOCO 2)

Um dos problemas para a obtenção da TS por sensoriamento remoto, conforme por Qin *et al.*, (2001), Sobrino *et al.*, (2004) e Souza, (2008), refere-se à dificuldade de validação simultânea das informações obtidas *in loco* no momento da passagem do sensor. Outro agravante é a falta de correção atmosférica e emissividade (VOOGT e OKE, 2003; WENG, 2009).

A título de validação e melhor entendimento do comportamento da superfície e suas variações térmicas diárias e sazonais, foram executadas cinco campanhas com a finalidade de investigar o comportamento de diferentes materiais comuns na área urbana, como asfalto, concreto, grama e entre outros. Neste campo também foi avaliado a interferência das sombras.

As principais campanhas foram realizadas na Praça Santos Andrade localizada no centro da cidade de Curitiba, nos dias 31, 1 e 2 de janeiro de 2013, durante os períodos da manhã e tarde.

Para o período outono/inverno realizou-se a medição da TS nos dias 21 e 31 de maio de 2013. Este local foi escolhido, por constituir-se numa área localizada no centro urbano, a qual é cercada por edifícios. Além disso, possibilita a obtenção do valor térmico de diferentes materiais de superfície que são representativos para toda área de estudo. Demais campanhas foram realizadas de forma pontual no Centro Politécnico (próximo à estação meteorológica do INMET e do SIMEPAR) na cidade de Curitiba e no parque São José dos Pinhais localizado no mesmo município durante os meses entre janeiro e agosto de 2013. Devido à ocorrência de nuvens nas datas selecionadas para coleta da TS, estes campos foram desconsiderados.

Com exceção da primeira campanha, os horários estipulados seguiram os horários prováveis da passagem do satélite TM/Landsat-5 sobre a área de estudo, que é por volta das 10h-11h da manhã, caso este ainda estivesse em operação. Para a execução desta etapa, foram utilizados os termômetros infravermelhos modelo MT-350 e dois termômetros digitais para medição da TA modelo HT-208, que foram cedidos pelo LABOCLIMA (Laboratório de Climatologia do Departamento de Geografia da UFPR).

4.2.3. Dados Meteorológicos (BLOCO 3)

Conforme destacado por Mendonça (1994) é necessário levar em consideração para estudo do clima urbano, além da sazonalidade e aspectos geográficos da paisagem, as condições meteorológicas do ambiente estudado, a fim de se obter as informações do estado atmosférico durante a aquisição dos dados obtidos pelas técnicas de sensoriamento remoto.

Neste sentido, foram avaliados os dias que antecederam a passagem do satélite, para se possível, justificar as influências que podem alterar as condições de reflectância e emissão da superfície no momento da aquisição destes valores pelo sensor remoto.

Para atender esta etapa foram solicitados os dados de temperatura, umidade, pressão atmosférica, insolação, velocidade dos ventos e precipitação das estações meteorológicas automáticas de Curitiba e Pinhais ao SIMEPAR, sendo a primeira localizada no Centro Politécnico da UFPR, Curitiba-PR e a segunda na Fazenda Canguiri localizada no município de Pinhais-PR, para os períodos de 1998 a 2010.

Os dados que compreendem os períodos de 1984 a 1997 para a cidade de Curitiba-PR foram obtidos através do *website* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados da estação de Pinhais foram obtidos junto ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). Neste período, os dados eram registrados por estações convencionais, implicando assim em apenas três medições diárias.

Neste estudo não foram avaliados os parâmetros de velocidade e direção dos ventos devido à ausência de dados representativos para área de estudo e de métodos que validem a adoção desta variável para o emprego da estimativa da TS. Mesmo assim, ressalta-se a importância deste parâmetro para a compreensão e dinâmica da movimentação do ar, nas diversas escalas de análise, em particular para o estudo do Clima Urbano (MENDONÇA, 1994).

A influência dos sistemas atmosféricos regionais atuantes não foi considerada para este estudo, uma vez que os dados da TS só podem ser captados no instante da passagem do sensor TM/Landsat-5. Desta forma, para subsidiar este estudo o método adotado contemplou a avaliação da

temperatura do ar e da umidade na hora próxima de passagem do satélite Landsat-5 e da precipitação acumulada para os três dias que antecederam o registro remoto para análise da TS estimada.

4.2.4. Considerações a respeito da organização dos resultados

Com base nos procedimentos metodológicos descritos neste capítulo, o Capítulo 5, apresenta os resultados obtidos pelo processamento digital aplicado nas imagens TM/Landsat-5, a partir de mapas temáticos e gráficos com base nos estudos preliminarmente observados na revisão bibliográfica.

Para facilitar a leitura cartográfica, o resultado dos processamentos da TS e do NDVI, juntamente com a composição colorida do AU-RMC estão apresentados no formato de cartas imagem para cada data investigada.

Para complementar a análise da TS, os dados da temperatura do ar registrados pelas estações meteorológicas de Curitiba e Pinhais foram organizados em tabelas para auxiliar a interpretação dos mapas.

A dinâmica climática regional que compreende o AU-RMC possui particularidades distintas em relação às bibliografias consultadas.

Sendo assim, a sistematização deste estudo foi apoiada em subdivisões temporais e sua estreita relação térmica com o ambiente, ou seja, a partir da sucessão de diferentes estágios de ocupação urbana do AU-RMC em diferentes condições de insolação.

Para avaliar os resultados obtidos pela correção atmosférica proposta por Coll *et al.* (2010), Equação 9 p.97, estes foram comparados com o método proposto por Artis e Carnahan (1982), na Equação 7 p.91. Em seguida, as diferenças da TS encontradas para os dois métodos foram comparadas com o NDVI do AU-RMC obtido pela Equação 8 descrita na página 94.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A estimativa da temperatura da superfície terrestre obtida a partir de técnicas de sensoriamento remoto está diretamente relacionada às características dos materiais da superfície e sua interação com a radiação eletromagnética refletida e emitida sobre diferentes geometrias que variam ao longo do tempo e do espaço.

Durante o pré-processamento das imagens, observou-se que a comparação da TS entre todos os anos estudados não possibilita uma análise adequada entre estes, devido à diferentes coberturas de superfície conforme a expansão do AU-RMC.

As dificuldades que permeiam a análise comparativa da TS em relação à cobertura da superfície são observadas pelos gráficos de NDVI ilustrados na FIGURA 14 os quais correspondem aos períodos de primavera / verão dos anos de 1985, 2000 e 2010.

Nestes gráficos observa-se que a cobertura vegetal do AU-RMC, obtida a partir da soma das áreas de menor intensidade vegetativa (0,3 a 0,5) com as de maior intensidade vegetativa (0,5 a 1,0) para o dia 30/11/1985, correspondiam a 50% da área total e já para o ano de 2010 estas mesmas classes reduziram para 27% da área.

Além da supressão da vegetação constatada, outra condição relevante que deve ser observada é o fator morfológico da vegetação, ou seja, a densidade da cobertura vegetal (distância entre as folhas) e dos fatores fisiológicos como a idade de planta. Além disso, o déficit hídrico e a perda de folhas, logo sua redução de biomassa que é observado nos períodos de outono e inverno.

Durante o período de primavera e verão a vegetação armazena maior quantidade de água na folha, fato que modifica a resposta espectral captada pelos sensores remotos. A maior intensidade de área verde contribui com maior quantidade de umidade no ar, logo auxilia na troca energética por condução com a superfície urbana ao entorno.

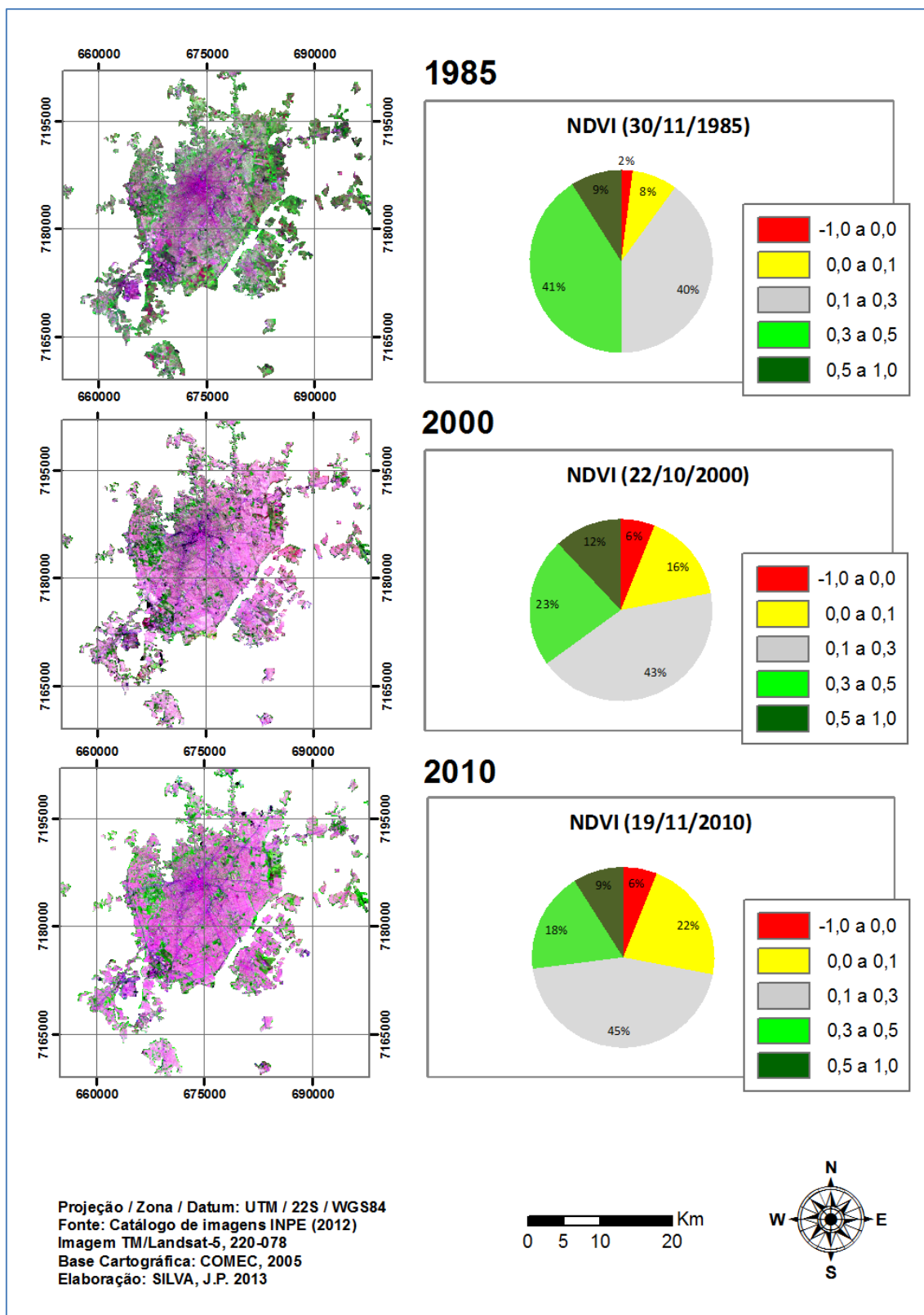


FIGURA 14 - EVOLUÇÃO DA COBERTURA DA SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA OS ANOS DE 1985, 2000 E 2010 A PARTIR DE IMAGENS TM/LANDSAT-5

Legenda NDVI: (-1,0 a 0,0) Sem Vegetação; (0,0 a 0,1) Predomínio de cobertura sem vegetação; (0,1 a 0,3) Predomínio de Material Construtivo com presença de Vegetação; (0,3 a 0,5) Predomínio de Vegetação com presença de Material Construtivo; (0,5 a 1,0) Predomínio de Vegetação.

Pelos gráficos da FIGURA 14 observa-se que a maior supressão das áreas com cobertura vegetal, ou seja, redução das classes de NDVI 0,3 a 1 (ver legenda) ocorreu entre o ano de 1985 onde essas correspondiam a 50% da área total, ao ano 2000 onde passaram a ocupar 35%.

Outro efeito ocasionado pelas diferentes alturas solares é que estas interferem na quantidade de insolação que atinge a superfície conforme a época do ano (sazonalidade), deste modo, a energia captada pelas cenas TM/Landsat-5 resulta em diferentes valores para os pixels que compõem a imagem da mesma superfície para diferentes períodos analisados, o que é potencializado também pela rugosidade da topografia urbanizada a partir das sombras que são projetadas pelas edificações mais altas e copas das árvores durante o período de baixa insolação.

A expansão das áreas urbanizadas em tons de rosa podem ser observadas na FIGURA 14 considerando a leitura cronológica entre os anos de 1985, 2000 e 2010 e acompanhadas pelos respectivos gráficos de NDVI.

Estas mudanças de intensidade da cobertura da superfície entre os anos de 1985 a 2010 estão relacionadas às diferentes formas de ocupação residencial, comercial e industrial das cidades que compõem a RMC.

O crescimento da mancha para leste corresponde a expansão da cidade de Curitiba e sua conurbação com os municípios de Colombo e Pinhais e mudança significativa da cobertura da superfície de São José dos Pinhais, Piraquara, Fazenda Rio Grande e Araucária.

As diferentes condições meteorológicas e de insolação obtidas neste trabalho proporcionaram a observação da interlocução da TS com a superfície urbana, possibilitando assim a checagem de sua influência sobre os diferentes gradientes térmicos produzidos pela superfície.

Diante do exposto, os resultados da análise foram organizados em cinco cenários, os quais foram delimitados de acordo com a passagem do satélite TM/Landsat-5 para cada ano estudado.

Esta organização se pauta na comparação isolada de um único período (ano), comparando assim, somente uma imagem com características de outono/inverno com uma de primavera/verão. Desta maneira, foi possível isolar e reduzir os efeitos das diferentes características da superfície do AU-RMC

entre os anos escolhidos, sendo aceitável, deste modo, avaliar apenas o parâmetro TS e sua relação com a cobertura da superfície.

Sendo assim, nos subcapítulos 5.1.1 ao 5.1.5 serão apresentados os resultados para cada cenário, considerando as características de TA, composição colorida RGB, NDVI e TS.

Para facilitar a interpretação dos três produtos cartográficos (RGB, NDVI e TS) dispostos nas cartas imagens, optou-se em utilizar a mesma simbologia temática para os subcapítulo 5.1, 5.2 e 5.3.

Assim, adotaram-se os intervalos (-1 a 0) para as áreas Sem Vegetação; (0,0 a 0,1) para as áreas com predomínio de cobertura sem vegetação; (0,1 a 0,3) para as áreas com predomínio de material construtivo e presença de vegetação; (0,3 a 0,5) para as áreas com predomínio de vegetação e presença de material construtivo; (0,5 a 1,0) para áreas com predomínio de vegetação.

Os intervalos foram definidos conforme a interpretação visual após o processamento digital das imagens de NDVI.

Para as imagens de TS adotou-se a escala de -0 a +36°C por está contemplar os intervalos obtidos para todos os períodos.

No subcapítulo 5.2, será realizada uma análise síntese dos cenários discutidos no subcapítulo 5.1, buscando estabelecer parâmetros comuns de interpretação para o entendimento dos condicionantes mais relevantes da TS para o AU-RMC e suas repercussões térmicas numa perspectiva temporal.

Para investigar as diferentes coberturas de superfície representativas no AU-RMC e sua potencialidade em gerar calor, no subcapítulo 5.3, foram selecionados pontos de interesse para discussão em maior detalhe, com base nas condições de baixa insolação (outono / inverno) e maior insolação (primavera / verão) para o ano de 2010.

Por fim, no subcapítulo 5.4 será apresentada uma comparação entre a obtenção da TS do AU-RMC com correção atmosférica e outra sem correção. Esta análise visa discutir os resultados obtidos por duas metodologias para a estimação da TS, proporcionando assim, uma avaliação quantitativa dos resultados até então não mensurados para o AU-RMC.

5.1. CENÁRIOS DA TS PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000, 2005 E 2010

5.1.1. Cenário 1 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da TS para o ano de 1985

Os dados meteorológicos registrados pelas estações convencionais no ano de 1985 eram registrados três vezes ao dia, sendo respectivamente os horários: 9h00, 15h00 e as 21h00. Para análise das condições meteorológicas, para todas as datas selecionadas, foram considerados os três dias que antecederam a passagem do sensor sobre a área de estudo.

A TABELA 2 apresenta as condições meteorológicas registradas pela estação de Pinhais (IAPAR) para o dia 06/05/1985 e dos três dias que antecederam a passagem do sensor sobre a área de estudo.

TABELA 2 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 03/05/1985 A 06/05/1985

DATA	TBS 9h	TBS 15h	TBS 21h	TBU 9h	TBU 15h	TBU 21h	UR 9h	UR 15h	UR 21h	PREC.
03/05	11.50	20.00	11.20	10.40	13.00	11.00	87.10	42.20	97.60	0.00
04/05	10.50	20.50	11.20	10.30	12.40	11.00	97.50	35.10	97.60	0.00
05/05	10.10	20.30	10.90	10.00	14.00	10.70	98.70	47.80	97.60	0.00
06/05	13.80	20.50	12.20	12.00	12.70	12.00	80.50	37.30	97.70	0.00

FONTE: IAPAR (2012)

Legenda: TBS – Temperatura de bulbo seco; TBU – Temperatura do bulbo úmido; UR – Umidade relativa; PREC – Precipitação acumulada para o dia.

Conforme a TABELA 2 as condições meteorológicas que antecedem o dia da análise da TS apresentam temperaturas constantes com ausência de precipitação para o período analisado. A FIGURA 15 apresenta o resultado dos processamentos executados para análise da cobertura do solo por NDVI (item 2) e da TS (item 3) para o AU-RMC para o dia 06/05/1985.

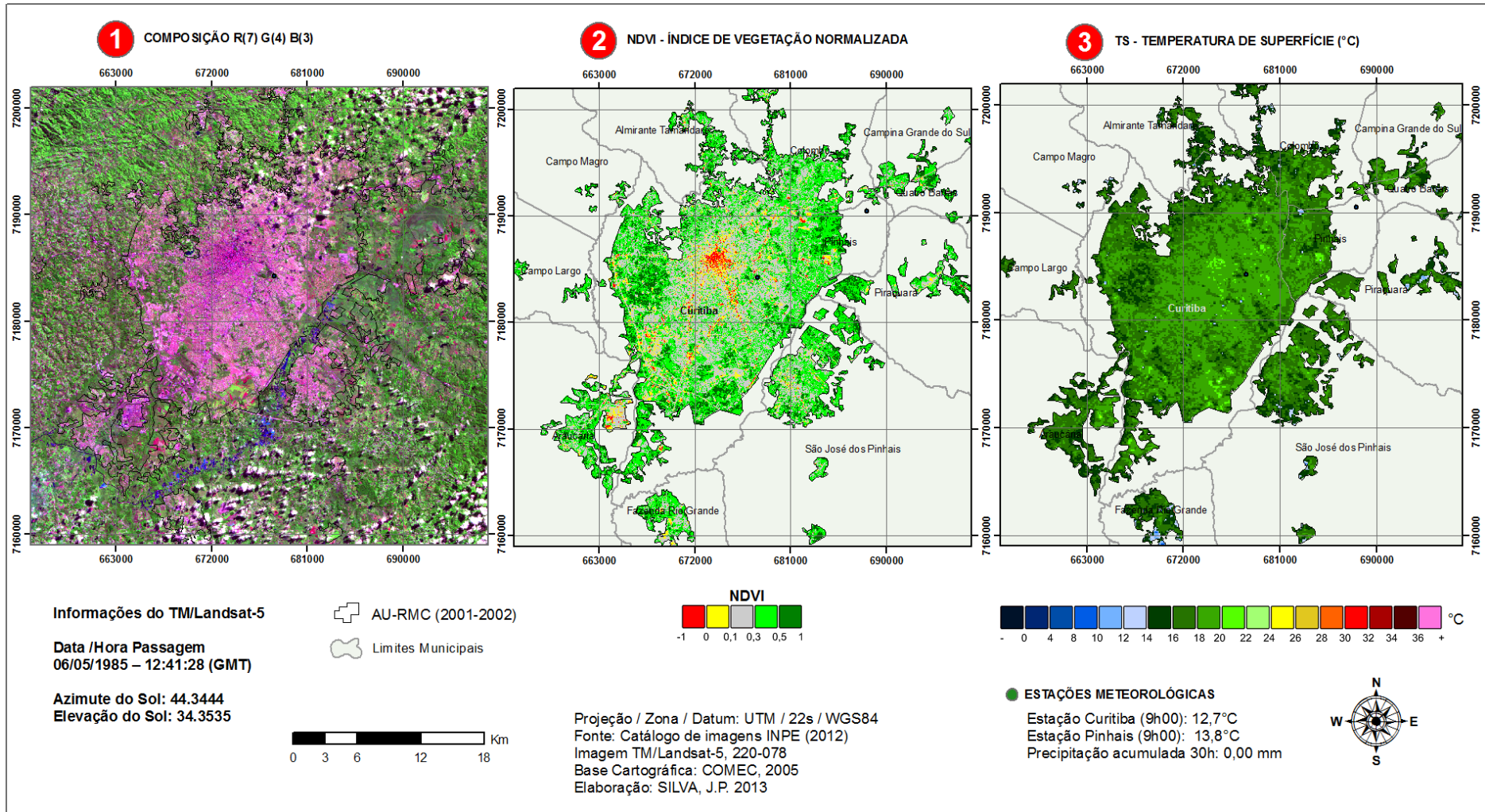


FIGURA 15 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 06/05/1985

Para enriquecer a visualização das cartas imagens de todos os cenários, elaborou-se o (item 1) a partir da composição colorida Red(7) Green(4) Blue(3) do TM/Landsat-5 com o intuito subsidiar a análise dos mapas temáticos de NDVI (item 2) e TS (item 3).

De acordo com o item 3 da FIGURA 15, cerca de 81,88% da TS é superior a 16°C, a qual é mais elevada que a TA (13,7°C) registrada às 9h00 para o dia 06/05/1985, concordando com a afirmação de Souza (2008) que argumenta que a $TS > TB > TA$.

Para esta data, como não existe nenhum registro da TA no momento da passagem do sensor, convencionou-se que a temperatura posterior as 9h00 tende a ser mais elevada, sendo assim, os dados meteorológicos de superfície observados validam a imagem térmica (item 3).

Neste ponto, deve-se deixar claro que não foi possível aplicar nenhum método para correção atmosférica para imagens térmicas fornecidas pelo INPE durante os anos de 1985 a 1999 devido à ausência de dados meteorológicos no momento da passagem do sensor sobre o AU-RMC.

O item 2 da FIGURA 15 apresenta o estado da vegetação para a data analisada. As cores em tons de verde (0,5 a 1) escuro indicam as áreas onde existe vegetação e esta possui um maior teor vegetativo e/ou árvores de grande porte. Estas áreas coincidem visualmente com as principais áreas vegetadas do item (1) e com as TS mais baixas no item (3).

As áreas onde predominam a classe verde claro (0,3 a 0,5) do item (2) correspondem às superfícies que possuem algum tipo de cobertura vegetal, principalmente espaços verdes, como vegetação arbustiva, culturas temporárias, reservas, parques, campos e gramíneas. Esta tonalidade também fica perceptível em ruas arborizadas e em algumas residências apesar da escala grosseira deste sensor para visualizar estes detalhes.

A classe cinza (0,1 a 0,3), corresponde a um limiar de transição, ou seja, é uma área urbana que possui cobertura vegetal entre as edificações que pode ser captada pelo sensor remoto.

A classe amarela (0 a 0,1) correspondem as áreas urbanas com pouca ou até mesmo a inexistência de vegetação. No geral, existe uma predominância deste intervalo para grandes avenidas, solo exposto e residências com materiais que refletem mais intensamente na banda 3.

A classe vermelha (-1,0 a 0) do item (2) está relacionada principalmente as áreas onde não existe vegetação se comparado com o item (1).

A área que corresponde ao centro da cidade de Curitiba, local que possui o maior número de edifícios do AU-RMC e conseqüentemente a maior quantidade de pixels em tom vermelho (item 2). Este fato está relacionado principalmente a maior quantidade de material construtivo desta área, além das sombras dos edifícios que são projetadas sobre a superfície e outras edificações no momento da aquisição da imagem pelo sensor TM/Landsat-5.

Ao comparar os três itens da FIGURA 15 observa-se que as áreas vegetadas apresentam as menores temperaturas em relação às áreas urbanizadas do AU-RMC.

Seguindo a mesma linha de interpretação, no item (3), observa-se que as temperaturas mais elevadas para este período estão distribuídas nas áreas entre as classes vermelho e amarelo. Justifica-se esta relação com a menor quantidade de vegetação. Apesar disso, a grande mancha em vermelho no centro do item (2) não corresponde totalmente as TS mais elevadas. Este fato está relacionado ao horário e a data da passagem do sensor, onde as sombras projetadas pelas edificações do centro da cidade de Curitiba não permitem uma correlação direta com temperaturas mais elevadas com ausência de vegetação.

As manchas com de TS mais elevadas, que são superiores a 20°C (cerca de 1,18% do AU-RMC) para esta data, correspondem principalmente a áreas com solo exposto, grandes estacionamentos, áreas industriais e pequenas aglomerações urbanas. Estas superfícies serão melhor discutidas no subcapítulo 5.3.

Considerando as condições de obtenção da TS, a amplitude térmica para o dia 06/05/1985 ficou entre 8 a 24°C. A partir da análise do item (3) obteve-se a seguinte percentagem da distribuição espacial da TS com relação às classes térmicas mais representativas: 18,12% da superfície imageada corresponde a faixa de 12 a 16°C. Já a faixa de 16 a 20°C corresponde a 80,70% da superfície do AU-RMC.

A próxima imagem analisada (FIGURA 16) corresponde ao período de verão. A TABELA 3 apresenta as condições atmosféricas registradas antes da passagem do sensor TM/Landsat-5.

TABELA 3 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 27/11/1985 A 30/11/1985

DATA	TBS 9h	TBS 15h	TBS 21h	TBU 9h	TBU 15h	TBU 21h	UR 9h	UR 15h	UR 21h	PREC.
27/11	22.10	20.00	16.00	18.90	18.00	15.60	73.30	82.00	95.90	0.00
28/11	14.00	17.00	13.60	13.20	14.30	12.90	91.30	73.90	92.20	0.90
29/11/	19.30	21.20	14.00	14.70	16.00	13.30	59.70	57.10	92.40	0.00
30/11	19.30	25.10	16.50	15.70	19.10	16.40	67.90	55.60	99.00	0.00

FONTE: IAPAR (2012)

Legenda: TBS – Temperatura de bulbo seco; TBU – Temperatura do bulbo úmido; UR – Umidade relativa; PREC – Precipitação acumulada para o dia.

Conforme a TABELA 3 nota-se que as temperaturas são mais elevadas do que o período anterior. Isso acaba se refletindo no mapa de NDVI e da TS estimada que estão ilustrados na FIGURA 16.

A comparação temporal também permite avaliar a diferença na iluminação da superfície e nas mudanças de uso do solo que podem ser facilmente percebidas no item (1) da FIGURA 16.

As manchas em vermelho (-1,0 a 0) e amarelo (0 a 0,1) no item (2), principalmente na área que corresponde ao centro da cidade de Curitiba, receberam um acréscimo quando comparado ao período anterior.

Para o dia 30/11/1985, o gradiente térmico da superfície ficou entre 16 a 34°C. A faixa de 20 a 24°C corresponde a 21,31%. As TS mais elevadas concentram as faixas de 24-26°C com 34,91% e de 26 a 28°C com 38,39% para a faixa de 26 a 28°C. Cerca de 4,38% da TS é superior a 28°C.

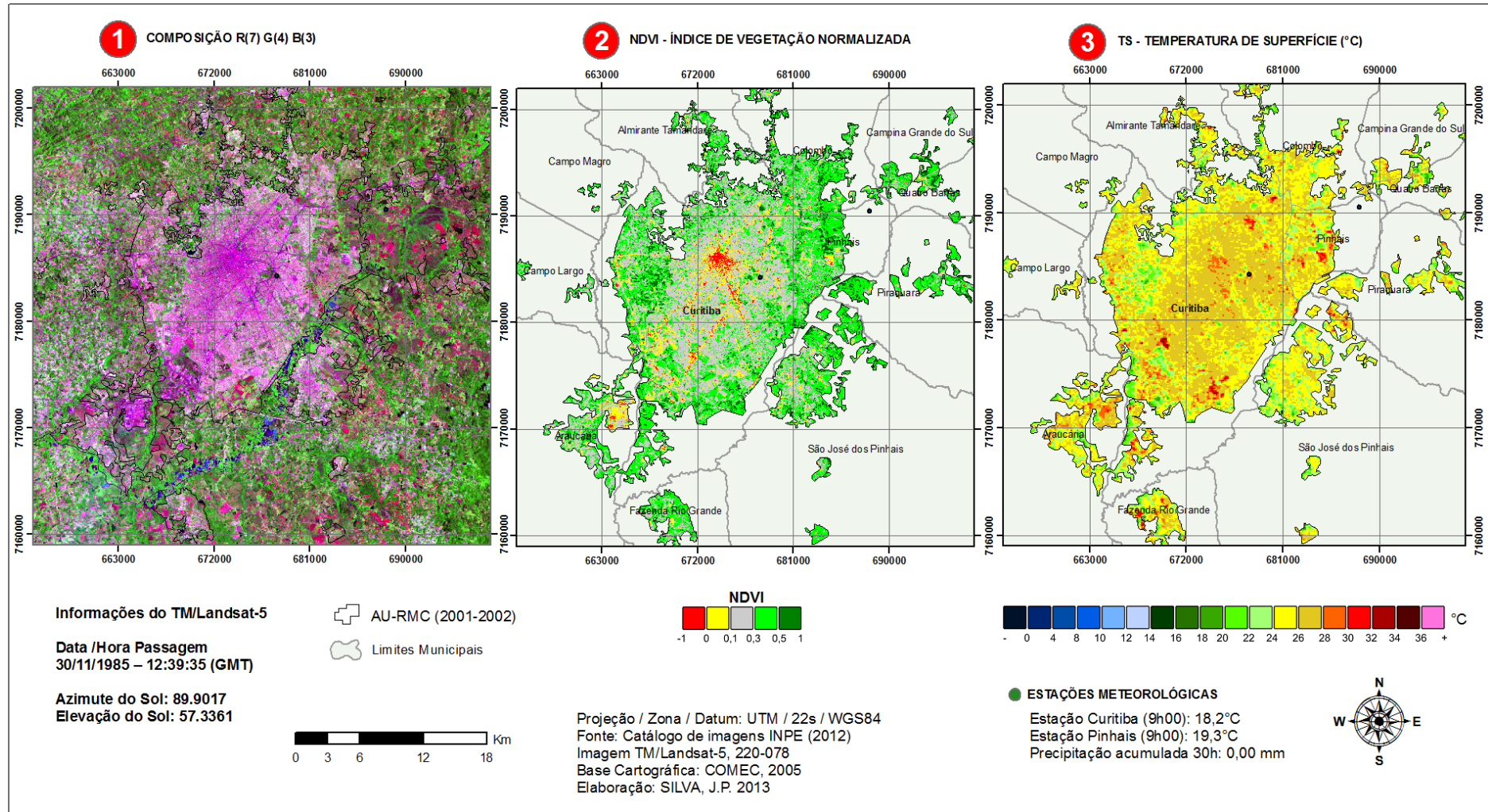


FIGURA 16 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 30/11/1985

O item (3) da FIGURA 16 apresenta uma nítida diferença de TS em relação ao período anterior. Nesta figura é possível evidenciar o surgimento de pontos quentes ou ilhas de calor de superfície (ICS) que se destacam dentro da paisagem do AU-RMC. Estas ICS estão relacionadas a maior capacidade da superfície converter a energia eletromagnética (radiação solar) em energia térmica e armazená-la devido as características do material utilizado em relação a área ao entorno.

Comparando os dois itens de TS, tanto para o dia 06/05 e 31/11, observa-se que existe padrões térmicos da superfície que potencialmente são mais elevados devido às características da superfície que podem ser interpretadas com base nas diferentes tonalidades do mapa do NDVI (item 2), onde nas áreas com ausência de vegetação durante o período de verão as temperaturas são mais elevadas.

Dentro destes padrões térmicos, existem áreas que concentram maior potencialidade para armazenamento de calor devido às características da superfície e sua rugosidade. Para o emprego desta técnica, as áreas situadas no centro da cidade de Curitiba não apresentam necessariamente as temperaturas mais elevadas devido à alta verticalidade das edificações, as quais projetam sombras sobre as edificações ao seu redor no momento da passagem do sensor.

As ICS com temperaturas mais elevadas desta figura (item 2), que variam entre 28 a 34°C, estão relacionados aos telhados de grandes barracões, grandes áreas impermeabilizadas com alta densidade de ocupação de pequenas edificações com pouca presença de cobertura vegetal, e arruamentos estreitos e solo exposto.

As altas temperaturas registradas estão relacionadas às características de baixo albedo e alta emissividade da superfície. Quando úmido ou coberto por uma fina camada de vegetação, existe a tendência que a temperatura da superfície seja mais amena.

5.1.2. Cenário 2 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da temperatura de superfície para o ano de 1993

Conforme a TABELA 4, o período que precedeu a passagem do sensor TM e conseqüentemente a estimativa da TS, diferente das imagens anteriormente analisadas apresentou uma precipitação acumulada de cerca de 5.30 mm dentro das últimas 30 horas da passagem do sensor e superior a 40 mm para as últimas 40 horas.

TABELA 4 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 12/07/1993 A 15/07/1993

DATA	TBS 9h	TBS 15h	TBS 21h	TBU 9h	TBU 15h	TBU 21h	UR 9h	UR 15h	UR 21h	PREC.
12/07	11.40	11.80	11.20	11.20	11.60	11.00	97.60	97.50	97.50	33.8
13/07	11.80	10.20	7.20	11.60	9.60	6.20	97.50	92.50	86.20	36.2
14/07	4.10	10.70	4.00	2.70	5.60	2.30	78.00	41.70	73.40	5.30
15/07	2.60	14.80	4.90	1.10	6.20	3.60	74.90	19.00	80.40	0.00

FONTE: IAPAR (2012)

Legenda: TBS – Temperatura de bulbo seco; TBU – Temperatura do bulbo úmido; UR – Umidade relativa; PREC – Precipitação acumulada para o dia.

Analisando as condições dos dias que antecedem a aquisição da TS para o dia 15/07/1993 na TABELA 4, observa-se que a precipitação acumulada (PREC) pode ter contribuído para TS baixas no momento do imageamento, uma vez que a umidade interfere na resposta espectral da superfície.

Outro fator relevante é atuação de uma possível massa polar que é bastante comum durante o período avaliado, propiciando assim baixas TA que estão descritas na TABELA 4, repercutindo assim em TS baixas e menores amplitudes térmicas que estão espacializadas no item (3) da FIGURA 17.

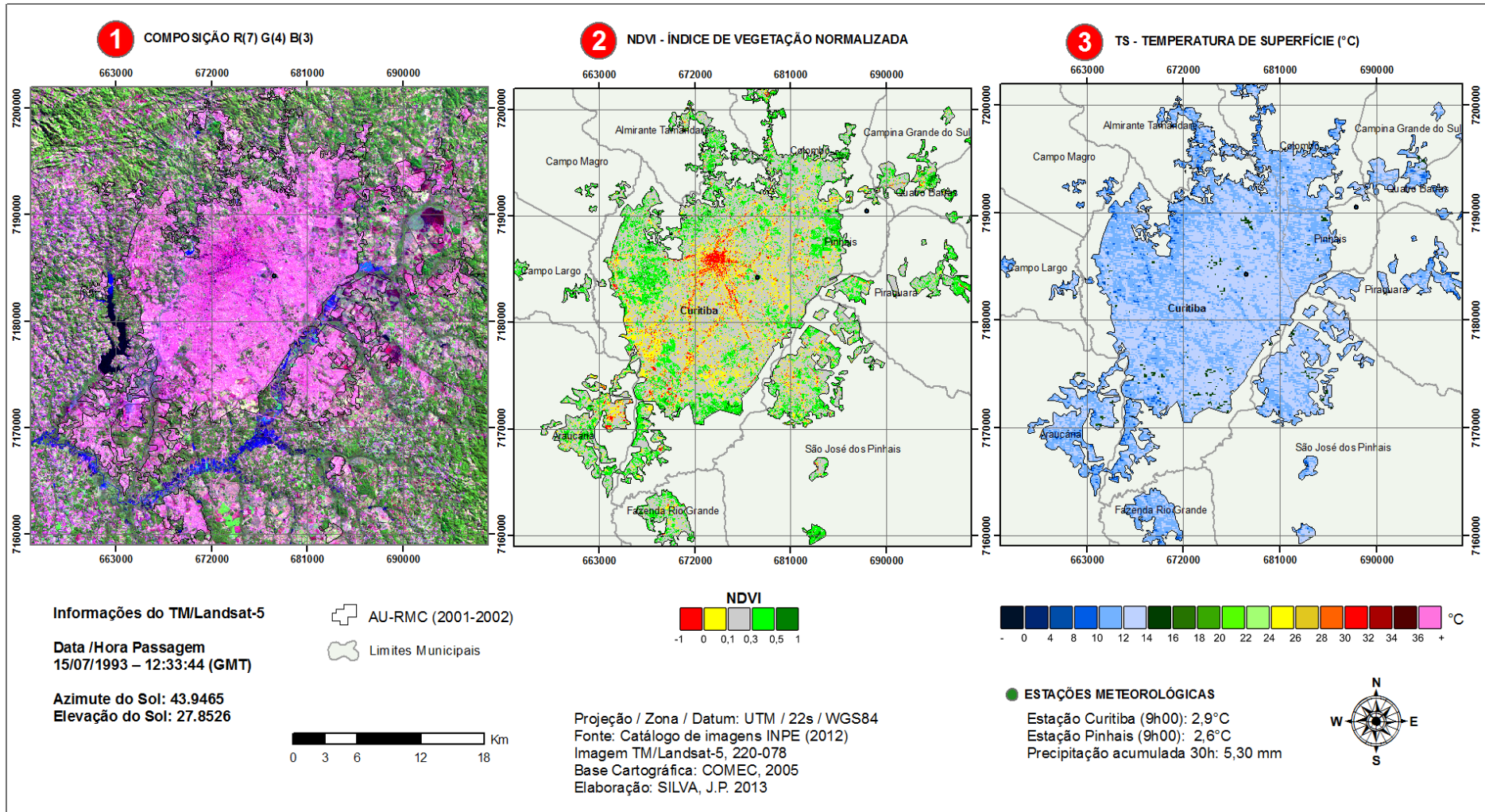


FIGURA 17 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 15/07/1993

Para o dia 15/07/1993, a amplitude térmica da superfície mais representativa, com a elevação do Sol em 27.8526°, ou seja, pouca insolação para o dia e baixa TA de 2,6°C, registrada para as 9h00, ficou estimado entre 8 a 16°C, sendo que 3,69% corresponde a faixa de 8 a 10°C. Entre a faixa de 10 a 12°C a área ocupada foi de 43,49% e para faixa de 12 a 14°C a área corresponde a 52,82% da TS.

A baixa elevação também provoca um aumento do sombreando das edificações, aumentando assim as áreas vermelhas no NDVI.

Para o período seguinte (01/11/1993 A 04/11/1993), apresentado na TABELA 5, as temperaturas mais elevadas e o menor acúmulo de precipitação que antecederam a passagem do sensor, diferentemente do período anterior (12/07/1993 a 15/07/1993), condicionaram modificações na resposta espectral da superfície terrestre, conseqüentemente ocorreram mudanças nos valores de superfície obtidos pelo NDVI e TS na FIGURA 18.

TABELA 5 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE PINHAIS PARA O PERÍODO DE 01/11/1993 A 04/11/1993

DATA	TBS 9h	TBS 15h	TBS 21h	TBU 9h	TBU 15h	TBU 21h	UR 9h	UR 15h	UR 21h	PREC.
01/11	21.30	25.50	18.60	18.50	18.10	16.70	76.00	47.00	82.20	0.00
02/11	16.90	21.10	14.80	16.00	18.00	14.40	90.90	73.40	95.70	2.70
03/11	16.40	25.50	16.40	14.90	16.40	15.60	84.90	36.70	91.90	0.00
04/11	15.90	25.50	15.70	13.70	14.90	14.70	77.80	28.10	89.60	0.00

FONTE: IAPAR (2012)

Legenda: TBS – Temperatura de bulbo seco; TBU – Temperatura do bulbo úmido; UR – Umidade relativa; PREC – Precipitação acumulada para o dia.

Para o dia 04/11/1993, a faixa de 20 a 24°C cerca de 40,89%, corresponde as áreas com maior percentual das classes em tom de verde (0,3 a 1,0) do NDVI, onde ocorre a maior cobertura vegetal (item 1 e 2). A faixa da TS entre 24 a 26°C (44,10%) corresponde à classe cinza (0,1 a 0,3).

A faixa da TS entre 26 a 28°C (13,39%) está situada sobre as classes em tom de vermelho, amarelo e cinza do item 2 da FIGURA 18.

As ICS mais elevadas que representam a TS superiores a 28°C (item 3), é a faixa que corresponde a menor área, cerca de 1%, situa-se principalmente sobre a classe vermelha e amarela do NDVI.

Constata-se que mudança sazonal é um fator importante para ser analisada, uma vez que a resposta espectral da superfície é condicionada pelo ângulo de elevação do sol e maior ou menor duração e insolação sobre a superfície. Além disso, de acordo com os dados fornecidos pelo SIMEPAR e IAPAR o regime pluviométrico da região da RMC tende a ser mais baixo durante os meses de abril a agosto, que pode ser averiguado pelo NDVI nas áreas de campos, culturas e remanescentes florestais que apresentam índices menores no item (2) da FIGURA 18.

Para o dia 04/11/1993, registrou-se um maior teor vegetativo (item 2) da FIGURA 18 em relação ao período anterior (FIGURA 17).

Este fato está relacionado com a estação de primavera, onde para este período são registrados volumes de precipitação superiores às médias de Abril a Agosto para cidade de Curitiba (MEDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Esta condição revela a importância da vegetação para amenização das ilhas de calor de Curitiba constatadas por Leal (2012) durante o dia, que pode ser observado pelo gradiente térmico entre as áreas vegetadas e não vegetadas.

Conforme o item (3) da FIGURA 18, cerca de 57,98% da TS é superior a 24°C para o recorte analisado, com exceção das áreas densamente vegetadas conforme os itens (1) e (2) desta mesma figura.

A atuação de uma massa de ar com característica polar evidenciada por baixas temperaturas registradas pela estação meteorológica durante o período de 01/11 a 04/11 homogeneizou e minimizou a ocorrência de pontos quentes na superfície que não se sobressaíram na paisagem como no cenário de verão de 1985 (FIGURA 16). Constatou-se desta forma que a mudança significativa do uso e ocupação do solo em relação aos dois períodos investigados de 1985 e 1993 não foi tão significativa a ponto de promover temperaturas mais elevadas devido à atuação de uma massa de ar fria para o período de novembro de 1993.

5.1.3. Cenário 3 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da temperatura de superfície para o ano de 2000

No intervalo entre os anos de 1993 e 2000 ocorreu uma expansão e intensificação de uso e ocupação da região metropolitana de Curitiba.

A partir deste ano, a mancha urbana proveniente do uso do solo urbano do AU-RMC se adequa mais a delimitação cartográfica elaborada pela COMEC (2006) a qual foi adotada para este estudo.

A partir deste período já é possível a aplicação de alguns métodos para correção atmosférica, uma vez que já existem dados meteorológicos registrados dentro do AU-RMC pelas estações automáticas com horários próximos do momento da passagem do sensor. Para esta finalidade são utilizados modelos empíricos para correção da radiação emitida pela superfície e por sequência estimativa da TS como as propostas metodológicas de Qin, *et al.*(2001); Sobrino *et al.* (2004), e Souza (2008). No entanto, com o objetivo de padronizar os resultados para todos os períodos analisados optou-se em não realizar a correção atmosférica neste capítulo.

Pela própria característica de inverno para área de estudo, as condições meteorológicas atuantes para este período de 28/05/2000 a 31/05/2000 favorecem TA baixas, as quais são descritas na TABELA 6 e maior homogeneidade da TS que é apresentada na FIGURA 19.

TABELA 6 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 28/05/2000 A 31/05/2000

DATA	TA 9h	TA 10h	UR 10h	TA 15h	TA 21h	PREC.
28/05	7.3	9.3	-	16.8	10.0	0.00
29/05	12.0	14.0	-	19.9	10.4	0.00
30/05	9.70	10.3	-	16.7	13.6	0.60
31/05	11.2	13.0	-	18.5	12.6	0.00

FONTE: SIMEPAR (2012)

Legenda: TA 10h – Temperatura medida próxima da passagem do sensor; UR – Umidade relativa; TA – Temperatura medida; PREC – Precipitação acumulada do dia.

Como pode ser observado na FIGURA 19, a TS (item 3) possui baixa amplitude térmica entre as classes mais representativas (12 a 20°C), sendo 28,64% para a faixa de 12 a 16°C e 70,39% para a faixa de 16 a 20°C.

Ao contrário dos períodos de primavera e verão, para o dia 31/05/2000, destacam-se em meio à paisagem urbana o surgimento de ilhas de frescor ou pontos frios, onde as temperaturas são mais baixas que as áreas circundantes, identificadas para esta data como inferiores a 13°C. Estas ilhas estão relacionadas a áreas com a presença de vegetação, onde a classe do NDVI é superior a 0,3 (item 2) e também pela presença de pequenas nuvens que não foram removidas devido à dificuldade na aplicação de um método que permita o tratamento destes ruídos em imagens do canal infravermelho térmico.

No período do mês de maio de 2000, assim como ocorreu nos períodos anteriores, devido às características climáticas da estação de outono/ inverno para área de estudo, caracterizou-se com um longo período de estiagem e conseqüentemente alteração na radiação refletida e emitida pela superfície as quais são captadas pelo sensor TM/Landsat-5.

Desta forma, durante este período a classificação do NDVI ficou um pouco comprometida, ocasionado por uma maior generalização das classes de NDVI devido à baixa resolução do sensor, algumas áreas que apresentavam pouca vegetação foram classificadas como áreas sem vegetação. Além da limitação imposta pela resolução do sensor, somam-se as baixas condições de biomassa da vegetação e pela influência atmosférica que não foi contemplada neste trabalho.

Os dados meteorológicos que antecedem a passagem do sensor para o dia 22 de outubro de 2000 são apresentados na TABELA 7.

Como pode ser observado na TABELA 7, a TA registrada pela estação automática do SIMEPAR, as 10h00, que corresponde ao horário mais próximo da passagem do sensor TM/Landsat-5, é superior a 22°C.

Logo, as TS espacializadas pelo recorte do AU-RMC (item 3) da FIGURA 20, apresentam temperaturas superiores a registrada pela estação meteorológica do SIMEPAR (2012).

TABELA 7 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 19/10/2000 A 22/10/2000

DATA	TA 9h	TA 10h	UR 10h	TA 15h	TA 21h	PREC.
19/10	19.1	21.3	-	29.8	20.9	0.00
20/10	21.3	24.5	-	28.4	22.7	1.20
21/10	18.3	19.8	-	26.4	18.2	0.00
22/10	19.9	22.0	-	29.8	21.6	0.00

FONTE: SIMEPAR (2012)

Legenda: TA 10h – Temperatura medida próxima da passagem do sensor; UR – Umidade relativa; TA – Temperatura medida; PREC – Precipitação acumulada do dia.

Para o dia 22/10/2000 as classes mais representativas com 71,31% compreendem a faixa de 28 a 36°C. As TS mais elevadas, superiores a 36°C representam 8,36% do AU-RMC.

Com a TA mais elevada (média 21,9°C), indicadas pela tabela deste período, pode-se comprovar a contribuição da vegetação para redução da TS, para as áreas que correspondem ao NDVI > 0,3, para o dia 22/10/2000, onde as TS mais amenas são de 24 a 28°C, as quais correspondem 9,12% do item 3 da FIGURA 20.

Destaca-se nesta figura a diferença de amplitude da TS de até 16°C entre as áreas vegetadas e não vegetadas no item 3. Contudo os efeitos mais efetivos da vegetação podem ser observados no final da tarde com observado por Leal (2012), que analisou a relação entre a vegetação de Curitiba e as ilhas de calor.

Observa-se pelo item 2 que para este dia fica evidenciado que a superfície das áreas situadas bairro centro da cidade de Curitiba (mancha vermelha) e seu entorno, concentram as TS mais elevadas (> 36°C) no item 3, as quais são até 12°C superiores as TS mais baixas registradas no AU-RMC.

As TS mais elevadas registradas nestas áreas estão relacionadas ao maior ocupação edificações com pouca ou até mesmo ausente de áreas verdes entre as edificações e espaços vagos, além de possuir maior quantidade de material asfáltico e concreto empregado nas grandes avenidas que ligam os bairros afastados ao centro da cidade de Curitiba.

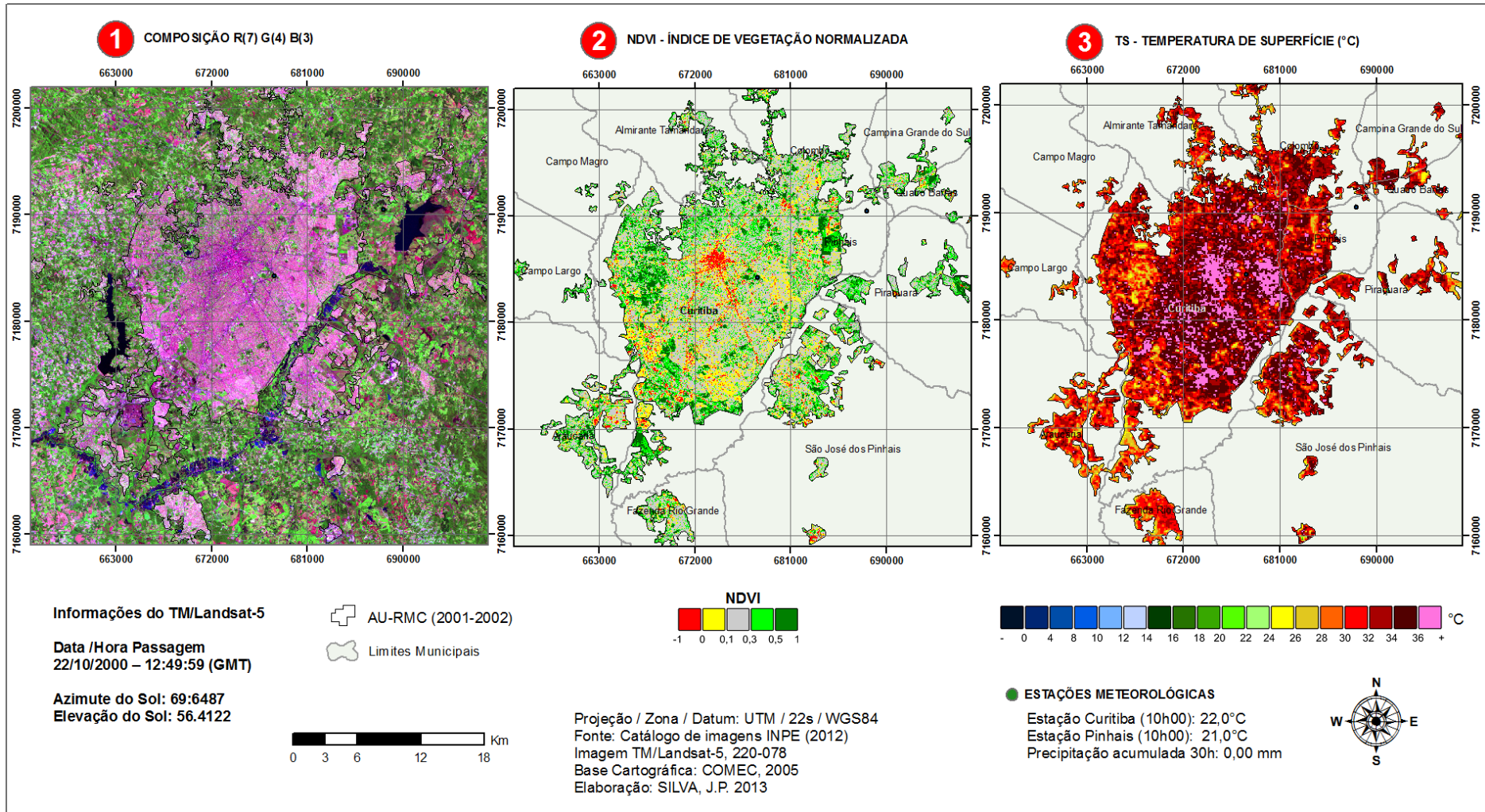


FIGURA 20 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 22/10/2000

Nas áreas periféricas do município de Curitiba ainda ocorrem bolsões de áreas com TS mais baixas (24 a 28°C) por estarem fora dos eixos de desenvolvimento industrial e comercial e/ou simplesmente por atenderem as dinâmicas imobiliárias de alto padrão com presença de áreas verdes.

Os resultados para este período indicam que houve uma maior intensificação do uso de material construtivo e impermeabilizado do solo no AU-RMC, conforme o mapa de NDVI do dia 22/10/2000 (item 2) da FIGURA 20, onde a soma das classes (-1 a 0,3) representam 65% da área total.

Para o dia 04/11/1993 (FIGURA 18, p.114), período o qual apresenta as características de insolação próximas ao dia 22/10/2000, as classes de NDVI no item 2 (-1,0 a 0,3) não superavam 49,99% da área total.

Pelos valores encontrados para o dia 22/10/2000, comprova-se que as intensificações do uso do material construtivo vêm contribuindo para o aumento da capacidade da superfície urbana em armazenar energia radiante do Sol convertendo-a em energia térmica.

Essa conclusão pode ser observada pela FIGURA 20, onde as classes em tom de verde (0,3 a 1) do NDVI (item 2) sustentam as TS mais baixas (24 a 28°C) no item 3 e as áreas onde predominam as classes em tom de amarelo e vermelho (-1 a 0,1) no NDVI proporcionam as TS superiores a 34°C (item 3), ou seja, um gradiente térmico superior a 12°C para uma TA registrada de 22°C pela estação meteorológica do SIMEPAR as 10h00.

5.1.4. Cenário 4 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da Temperatura de Superfície para o ano de 2005

Um comentário pertinente para esta etapa da análise é que não foi possível obter uma cena do sensor TM/Landsat-5, durante os anos de 2003 a 2006 com a ausência de nuvens para completar a análise temporal.

Desta maneira, as únicas imagens disponíveis, mesmo com presença de nuvens para o período de primavera/verão foram as imagens do ano 2005.

Como já discutido nos cenários anteriores, quando a TS estimada do AU-RMC é aferida em períodos de outono / inverno ou quando a TA registrada pela estação meteorológica é baixa, esta apresenta um menor gradiente térmico entre as diferentes coberturas de superfície a qual não supera 7°C.

No entanto, o dia 01/08/2005, apresenta um dia atípico em relação aos outros anos avaliados, onde a TA registrada de aproximadamente 23,8°C na estação meteorológica de Curitiba, não atende os critérios propostos por Souza (2008), onde $TS > TB > TA$ cuja TS do ponto da estação não superou 22°C.

A TA mais elevada que os períodos anteriores pode estar relacionada ao movimento de advecção de ar quente proveniente da porção NW e N conforme dados registrados pelas estações do SIMEPAR para o dia 01/08. A TABELA 8 apresenta a TA para o período que antecede a passagem do sensor dia 01/08/2005 e a FIGURA 21 apresenta os valores de TS obtidos. .

TABELA 8 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 29/07/2005 A 01/08/2005

DATA	TA 9h	TA 10h.	UR 10h.	TA 15h	TA 21h	PREC.
29/07	23.0	24.1	45.4	24.1	16.20	0.00
30/07	24.1	24.5	38.5	23.4	15.50	0.00
31/07	23.2	23.6	39.3	22.8	14.7	0.00
01/08	23.2	23.8	35.8	23.3	15.2	0.00

FONTE: SIMEPAR (2012)

Legenda: TA 10h – Temperatura medida próxima da passagem do sensor; UR – Umidade relativa; TA – Temperatura medida; PREC – Precipitação acumulada do dia.

As classes mais representativas da TS para o dia 01/08/2005 no item 3 da FIGURA 21 são as de 18 a 20°C, com 23,17% da área que corresponde aos tons verdes no item 2 do NDVI, e do intervalo de 20 a 22°C com 65,80% a qual situa-se sobre as área em amarelo e cinza (0,1 a 0,3) no NDVI.

Apesar da baixa elevação do Sol de 34.3286 (FIGURA 21) o gradiente térmico do dia 01/08/2005 foi de 8°C. A TS obtida para esse dia é a mais elevada em relação ao volume de área do AU-RMC, quando comparado aos outros períodos de outono/inverno já apresentados (FIGURAS 15, 17 e 19).

A TABELA 9 apresenta às condições do período de 18/11/2005 a 21/11/2005, a qual foi registrada a série de TA mais elevada para todos os períodos analisados.

TABELA 9 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 18/11/2005 A 21/11/2005

DATA	TA 9h	TA 10h	UR 10h	TA 15h	TA 21h	PREC.
18/11	24.0	25.2	61.6	23.4	20.2	0.00
19/11	26.8	26.4	55.9	25.9	18.6	0.00
20/11	22.8	21.6	71.6	18.8	13.3	0.00
21/11	23.0	24.2	33.7	24.9	15.8	0.00

FONTE: SIMEPAR (2012)

Legenda: TA 10h – Temperatura medida próxima da passagem do sensor; UR – Umidade relativa; TA – Temperatura medida; PREC – Precipitação acumulada do dia.

Devido a presença de nuvens neste cenário, os dados para esse período não foram quantificados. No entanto, essa imagem permite observar a interferência da borda de uma nuvem para interpretação da TS.

Os tons em azul e verde do item (3) da FIGURA 22 abaixo da coordenada UTM 718000 identificam influência das nuvens como ruído para obtenção da TS pelo sensor térmico TM/Landsat-5.

Quando comparadas com a TS, estas áreas estão de acordo com as temperaturas mais baixas obtidas, as quais são influenciadas pela aproximação e passagem de grandes nuvens reduzem os valores emitidos pela superfície.

5.1.5. Cenário 5 - Análise espacial das condições de superfície para estimativa da temperatura de superfície para o ano de 2010

As baixas TA (média 16,57°C) para o período que antecede o dia 31/08/2010 apresentadas na TABELA 10 confirmam os baixos valores da TS estimadas (14 a 26°C) no item (3), da FIGURA 23.

Considerando o ponto onde foi registrado a TA, o valor da TS (21,3°C) concorda com a TA < TB < TS.

TABELA 10 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 28/08/2010 A 31/08/2010

DATA	TA 9h	TA 10h	UR 10h	TA 15h	TA 21h	PREC.
28/08	13.0	15.5	79.1	27.6	14.5	0.00
29/08	13.8	18.3	72.4	28.9	17.9	0.00
30/08	14.2	15.0	82.5	19.1	14.2	0.00
31/08	15.7	17.5	73.2	24.9	17.0	0.00

FONTE: SIMEPAR (2012)

Legenda: TA 10h – Temperatura medida próxima da passagem do sensor; UR – Umidade relativa; TA – Temperatura medida; PREC – Precipitação acumulada do dia.

O dia 31/08/2010, concorda com os períodos de outono/inverno anteriormente analisados, apresentando baixo gradiente térmico entre a TS mais baixa e mais elevada.

As classes com TS mais representativas são: 36,90% para o intervalo de 16 a 22°C; 44,94% para o intervalo de 22 a 24°C; e 18,70% para as TS cujos valores são superiores a 24°C, as quais predominam sobre as áreas com baixa/ausência de cobertura vegetal.

O dia 31/08/2010 caracterizou-se com gradiente térmico de 9°C para uma TA de 17,5°C registrada as 10h00.

Comparando com os períodos anteriores de outono / inverno, o ano de 2010 apresenta TS mais elevadas que são superiores a 22°C para mais de 60% da área, e os menores valores de NDVI, 9% para classe (0,5 a 1,0) para o AU-RMC.

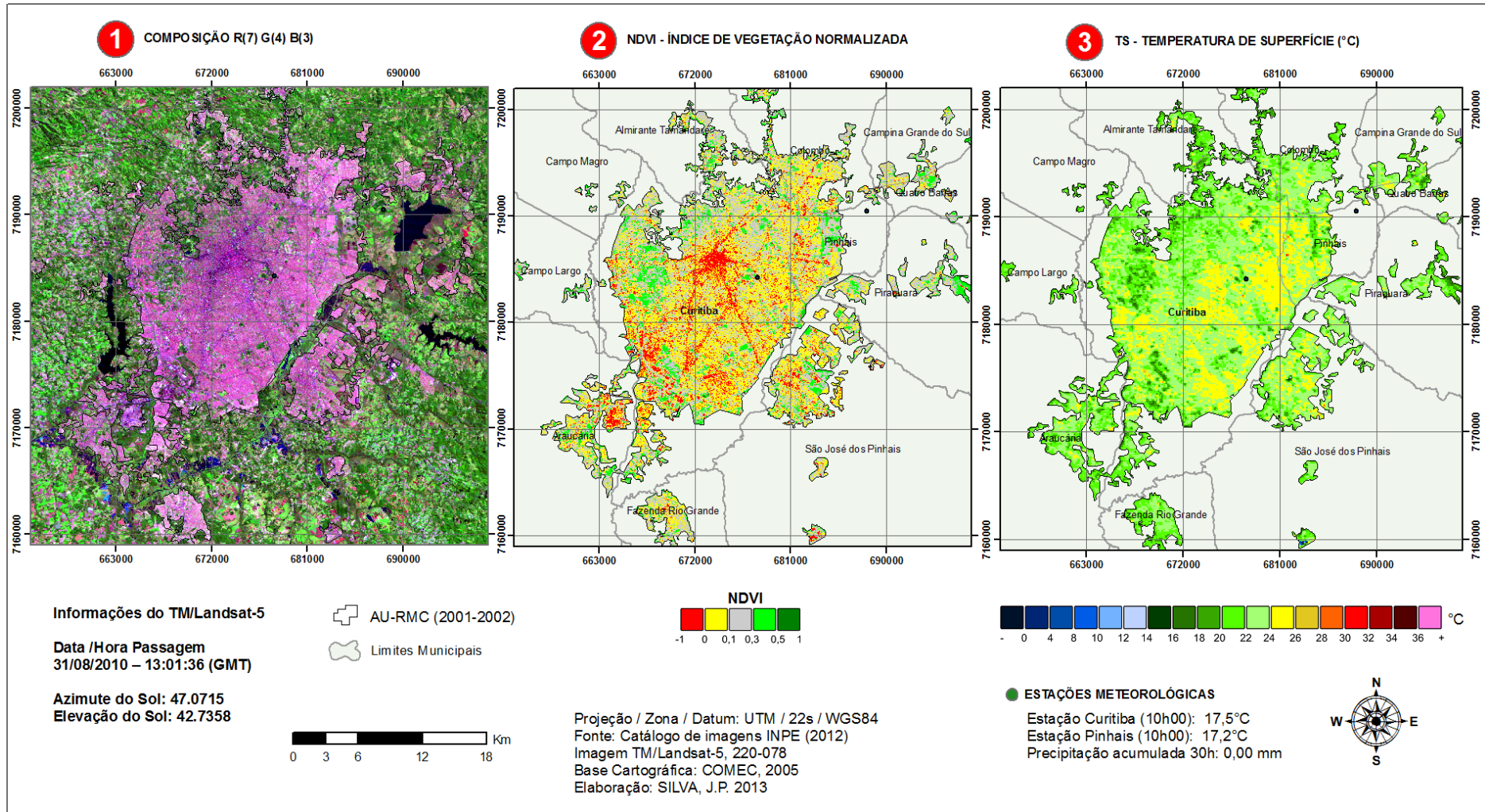


FIGURA 23 - CARTA IMAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO AU-RMC PARA O DIA 31/08/2010

No geral a TS (22 a 38°C) do AU-RMC estimada para o dia 19/11/2010 (FIGURA 24), é superior ao valor registrado da TA (21,8°C) registrada pelo SIMEPAR a qual é apresentada na TABELA 11.

TABELA 11 - DADOS METEOROLÓGICOS DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DE CURITIBA PARA O PERÍODO DE 16/11/2010 A 19/11/2010

DATA	TA 9h	TA 10h	UR 10h	TA 15h	TA 21h	PREC.
16/11	16.7	17.5	79.0	17.0	15.3	1.60
17/11	18.7	20.0	63.3	23.4	16.1	3.40
18/11	18.8	20.3	56.7	23.6	18.3	0.00
19/11	18.5	21.8	50.8	26.9	18.9	0.00

FONTE: SIMEPAR (2012)

Legenda: TA 10h – Temperatura medida próxima da passagem do sensor; UR – Umidade relativa; TA – Temperatura medida; PREC – Precipitação acumulada do dia.

As condições da cobertura da superfície e TA para o dia 19/11/10 determinaram uma nova espacialização do gradiente térmico do AU-RMC, a qual não coincide totalmente com as áreas com ausência de vegetação em vermelho (-1 a 0) da área central do item 2 da FIGURA 24.

No entanto, as áreas em verde (0,3 a 1) do NDVI apresentam as TS mais baixas.

Analisando os gradientes térmicos mais representativos do dia 31/08/2010, com intervalo 16 a 28°C, e do dia 19/11/2010 com intervalo de 22 a 38°C, nota-se, como nos anos anteriormente analisados, uma maior amplitude térmica da superfície para o segundo dia analisado.

Deste modo, é possível considerar que o mesmo material da superfície urbana possui comportamentos distintos em relação à quantidade de insolação recebida durante o mesmo ano para as diferentes estações.

Neste sentido, no próximo subcapítulo (5.2) serão apresentados os dados de TS obtidos em campo por meio de um termômetro digital infravermelho que validam estas observações, bem como uma síntese das principais observações dos resultados obtidos para os anos avaliados.

5.2. ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000, 2005 E 2010

De maneira geral, o acompanhamento da evolução térmica da superfície do AU-RMC revelou alguns pontos que não podem ser perceptíveis utilizando apenas uma simples aplicação da imagem termal do sensor TM/Landsat-5 para o entendimento de todo o contexto que envolve o surgimento de ICS.

O primeiro ponto averiguado refere-se a altitude e azimute do Sol em relação à área imageada, também observada por Collischonn (1998), Saydelles (2005) e Moreira (2009).

Quanto maior for sua altitude maior será a concentração de energia por unidade de área. Em áreas urbanas que apresentam edifícios altos, dependendo da posição do Sol no momento da aquisição da imagem, o efeito das sombras pode ocultar toda a intensidade térmica da superfície que não pode ser captada pelo sensor remoto.

A estimativa da emissividade da superfície a partir de sensores remotos ou de modelos empíricos é de extrema relevância para os resultados finais. A dificuldade maior está relacionada à heterogeneidade da superfície e sua alternância conforme o estado atmosférico e sazonalidade. Para este trabalho, a vegetação torna-se um bom indicativo, visto que pode mudar de maneira drástica suas características de absorção e emissão conforme a disponibilidade de iluminação e umidade presente na superfície.

A validação da TS pela TA, considerando os pressupostos que $TS > TB > TA$ (Souza, 2008) torna-se uma ferramenta que possibilita a validação da estimativa da TS quando não existe registro de dados pontuais coletados por estações meteorológicas ou por controle de campo no momento da passagem do sensor para aferição da imagem térmica.

No entanto, para dias de outono e inverno esta afirmação não pode ser confirmada para AU-RMC devido à maior atuação de massas de ar frio para este período como observado por Danni-Oliveira (1999).

Para tanto, deve-se levar em consideração os dias antecedentes da passagem do satélite para compreensão da configuração da TS gerada a partir do processamento digital da imagem térmica.

Neste estudo, a análise temporal, permitiu retirar os efeitos da cidade de forma parcial comparando os anos 2010 e 1985, possibilitando assim averiguar as diferentes intensidades de urbanização em diferentes combinações meteorológicas e sua respectiva TS produzida.

A expansão da mancha urbana evidenciada desde a década de 1980 por Ultramari e Moura (1994) e Baliski (2011), proporcionou uma nova configuração da distribuição da TS do AU-RMC para os anos seguintes.

Ficou evidenciado pela análise dos diferentes cenários que existem dois padrões térmicos para a superfície do AU-RMC. O primeiro padrão contempla o período próximo à estação de verão, onde ocorre maior amplitude térmica da TS entre as diferentes coberturas, devido à maior concentração de insolação que aquece a superfície. O segundo padrão é definido pelas estações de outono e inverno, onde a TS apresenta menor amplitude térmica e temperaturas mais amenas entre as diferentes classes de uso. Estes padrões são determinados pela quantidade de energia que circula no ambiente. Sendo assim, constata-se que a vegetação tem papel importante neste processo, pois minimiza os efeitos térmicos da TS dentro do ambiente urbano.

Na maioria das imagens a TS do bairro Centro de Curitiba, sinalizada em todos os períodos (item 2) com uma mancha vermelha (-1 a 0) no centro do AU-RMC, não se destacou das demais superfícies apesar de possuir maior intensidade de área impermeabilizada e construída. Este resultado é apontado como uma das maiores limitações para estimativa da TS em áreas urbanas, no qual o adensamento vertical mascara a TS obtida pelas áreas sombreadas e adjacentes durante o momento de aquisição da imagem térmica.

Em relação a esse mascaramento e aos diferentes valores de TS e NDVI obtidos nesta pesquisa, a TABELA 12 apresenta a TS obtida de uma relação de materiais que são encontrados na superfície urbana e sua relação elevação do Sol. Para uma melhor representatividade das diferentes intensidades de insolação, conforme a elevação do Sol e massas atuantes, os dados de campo foram obtidos durante os meses de janeiro e maio de 2013.

As informações da superfície foram coletadas próximas ao horário de passagem do satélite Landsat-5 utilizando o termômetro infravermelho modelo MT-350.

Nesta tabela pode ser observada a relação entre a TA do ambiente e a TS medida *in loco* para os diferentes materiais da superfície urbana durante o horário hipotético da passagem do sensor TM/Landsat-5, caso o mesmo estivesse em operação.

TABELA 12 - MEDIÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE DURANTE OS PERÍODOS DE VERÃO E INVERNO DO ANO 2013

DATA	31/01	01/02	21/05	31/05
HORA	10h00	10h00	10h00	10h00
Temperatura do ar (TA)	18.1	19.8	17.0	14.4
Asfalto	32	34-39	19.0	20.0
Asfalto (sombra)	27	28	13.0	18.0
Calçada (pedra)	27-31	34-37	20.0	13.5
Calçada (sombra)	23	25-27	13.0	9.0
Gramma	27	29	21.0	21.0
Gramma (sombra)	21	25-27	13.0	16.5
Gramma (seca)	24-31	34-37	13.0	19.5
Solo (exposto)	26	32-38	17.0	15.0
Solo (sombra)	21	24	10.0	9.0
Fonte (água)	20	21	18.0	14.0

FONTE: Autor (2013)

Nota: Para a temperatura do ar foi adotado o valor registrado em grau Celsius (°C) pela estação meteorológica do INMET localizada no campus centro politécnico (UFPR) em Curitiba.

Os dados mensurados desta tabela foram utilizados para comparar com as temperaturas estimadas a partir do processamento digital das imagens do canal infravermelho térmico do sensor TM/Landsat-5.

Em todos os dias de coleta de campo foi observado que a temperatura dos corpos d'água medidos pelo termômetro MT-350 é muito próxima as

temperaturas medidas pelas estações meteorológicas do INMET, como pode ser observado na TABELA 12.

Em observação de campo, constatou-se que a TS varia conforme a presença de água no solo e/ou cobertura vegetal.

Diferente dos dias 31/01 e 01/02/2013, os dias 21/05 e 31/05/2013 caracterizaram-se pela atuação de ventos de baixa a moderada intensidade.

Com base nos valores apresentados na TABELA 12 e pelas observações em campo, notou-se que em todos os dias de levantamento a TS dos alvos avaliados sempre exibiam temperaturas superiores a do ar, com exceção dos objetos que não estavam expostos à luz solar, ou seja, quando os materiais estavam em condição de sombra.

A tendência registrada no decorrer do dia foi que alguns materiais acumularam mais energia radiante, como é o caso do asfalto que no horário das 15h30 no dia 01/02/2003 a TS registrada foi de 49°C, sendo que em condições de sombra a mesma superfície não ultrapassou os 33°C para uma temperatura do ar de 24°C.

Em situação de inverno foi observado *in loco* que a temperatura entre os mesmos materiais apresenta menores amplitudes durante o decorrer do dia.

A tonalidade da superfície, a umidade e as condições de vento proporcionaram temperaturas diferentes mesmo entre os materiais com características semelhantes para todos os dias de observação.

Apesar do caráter qualitativo desta pesquisa em escala temporal, a qual não possibilita a obtenção de dados de controle de campo de forma simultânea, a checagem dos materiais de superfície em diferentes condições de tempo atendeu os critérios de ausência de nebulosidade e dos materiais que são representativos para a superfície do AU-RMC.

Os fatores observados que mais influenciaram os resultados da análise, conforme a resolução espacial de 60 metros do TM/Landsat-5, a qual possibilita uma análise regional do AU-RMC, foi à cobertura da superfície (côr) e suas diferentes intensidades de ocupação e vegetação (tonalidade), observadas na composição RGB da superfície pelos cenários apresentados no capítulo 5.1.

Conforme as cartas imagens analisadas, os valores de TS mais elevados tendem a seguir a redução do valor do NDVI e expansão da mancha

urbana ocorrida de forma mais intensa durante os períodos de 1985 a 2000, observado pelo contraste das imagens utilizadas neste trabalho.

No geral, observa-se que em áreas abertas, sem edificações elevadas e com menor quantidade de vegetação apresentam as temperaturas mais elevadas do que as áreas edificadas.

Este fato pode estar relacionado à baixa emissividade dos materiais e rugosidade do terreno, onde normalmente quando são impermeabilizadas com material asfáltico e concreto possuem maior capacidade de retenção de calor proveniente da radiação solar.

A FIGURA 25 sintetiza a distribuição dos valores da TS, de 8 a 26°C, para os anos de 1985, 1993, 2000 e 2010, considerando as datas de aquisição das imagens TM/Landsat-5 como sendo representativas para os períodos de outono e inverno para o AU-RMC.

Não foram utilizados os valores obtidos da TS para os dias 01/08 e 21/11/2005, pelo motivo da segunda data apresentar nuvens sob a área de estudo, podendo assim comprometer a análise temporal entre os anos estudados.

De acordo com a FIGURA 25, o dia 15/07/1993 apresentou as TS mais baixas entre os períodos analisados. A TA registrada para este dia também é a mais baixa, cerca de $\geq 2,9^{\circ}\text{C}$.

A TS do ano de 1985 apresentou o gradiente mais representativo entre 14 a 20°C, sob TA de $\geq 12,7^{\circ}\text{C}$ registrada as 9h00.

Com a TA de 13°C registrada para 10h, o dia 31/05/2000, caracterizou-se com TS entre 12 a 20°C. Observa-se que houve um aumento das áreas onde as TS são mais baixas em relação ao ano de 1985, considerando que a TA são similares para os anos de 1985 e 2000.

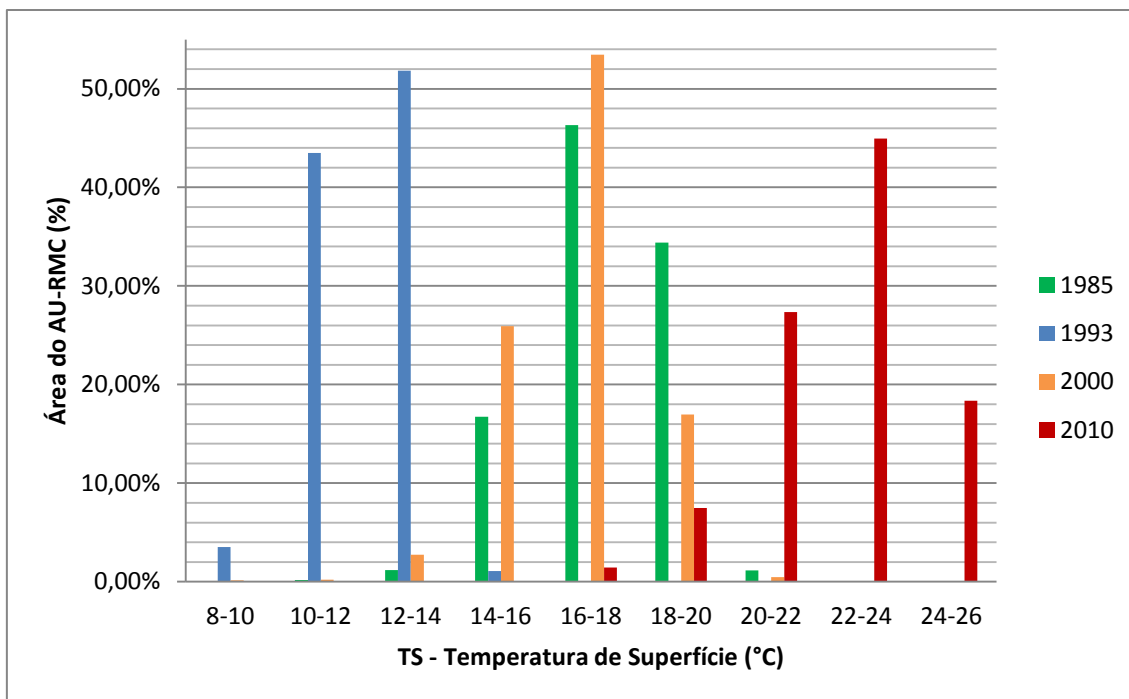


FIGURA 25 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DOS DIAS REPRESENTATIVOS AOS PERÍODOS DE OUTONO/INVERNO PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000 E 2010

A TS para os dias 06/05/1985 e 31/05/2000 são as que apresentam maior semelhança espacial, fato que também ocorre com TA para as duas datas, as quais são de $\geq 12, 7^{\circ}\text{C}$ (9h00) e 13°C (10h00) respectivamente.

O dia 31/08/ 2010 caracterizou-se com a TS mais elevada, com intervalo de 16 a 24°C . A TA registrada para 10h00 foi de 17°C .

Uma observação pertinente é que a TS está condicionada a quantidade de insolação recebida pela superfície e presença de massas de ar atuantes como observado por Mendonça (1994).

Neste sentido, a TS para as estações de outono e inverno apresentam as temperaturas mais baixa em relação ao período de primavera / verão.

A FIGURA 26 apresenta o gráfico da TS obtido para o período de primavera / verão para os anos de 1985, 1993, 2000 e 2010.

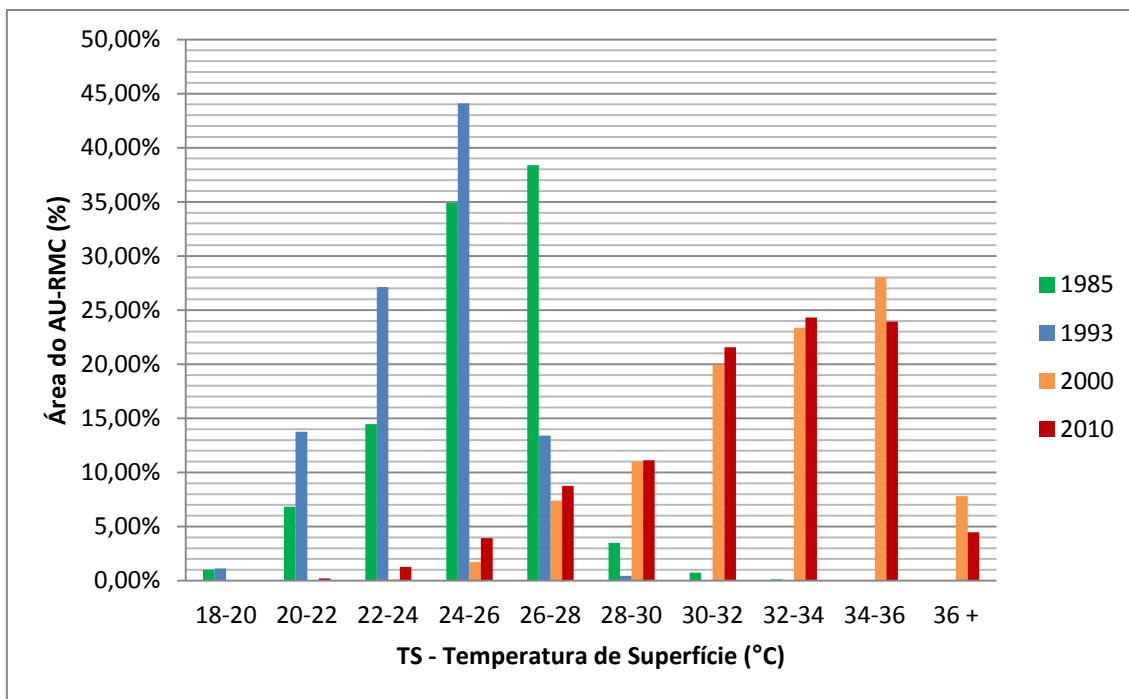


FIGURA 26 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DOS DIAS REPRESENTATIVOS AOS PERÍODOS DE PRIMAVERA/VERÃO PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000 E 2010. FONTE: O autor (2013)

Em relação ao período de primavera/verão, os valores mensurados para os datas dos anos de 2000 e 2010 concentraram as TS's mais elevadas para os períodos analisados. A TA medida para o dia 22/10/2000 foi registrada em 22°C, e para o ano de 2010 foi de 21,8°C, ambas para as 10h00.

O dia 04/11/1993, concentrou 99,5% da TS entre o intervalo de 18 a 28°C, com TA de $\geq 16^{\circ}\text{C}$ para as 9h00, consequentemente apresentou os intervalos de TS mais baixos.

O dia 30/11/1985, com TA de $\geq 18,2^{\circ}\text{C}$ para as 9h00, apresentou o intervalo entre 24 a 28°C. Como este período apresenta maior quantidade de vegetação, esta condição pode ter sustentado TS mais amenas.

Apesar dos gráficos apresentarem uma tendência de aumento da TS, não é possível quantificar esta afirmação, uma vez que as imagens foram captadas em diferentes condições atmosféricas e de cobertura da superfície que podem ser observadas na FIGURA 27.

Uma comprovação eficiente seria avaliar a TS com a mesma quantidade de insolação recebida para todos os dias estudados, o que não foi possível devido à inexistência de imagens com as mesmas características.

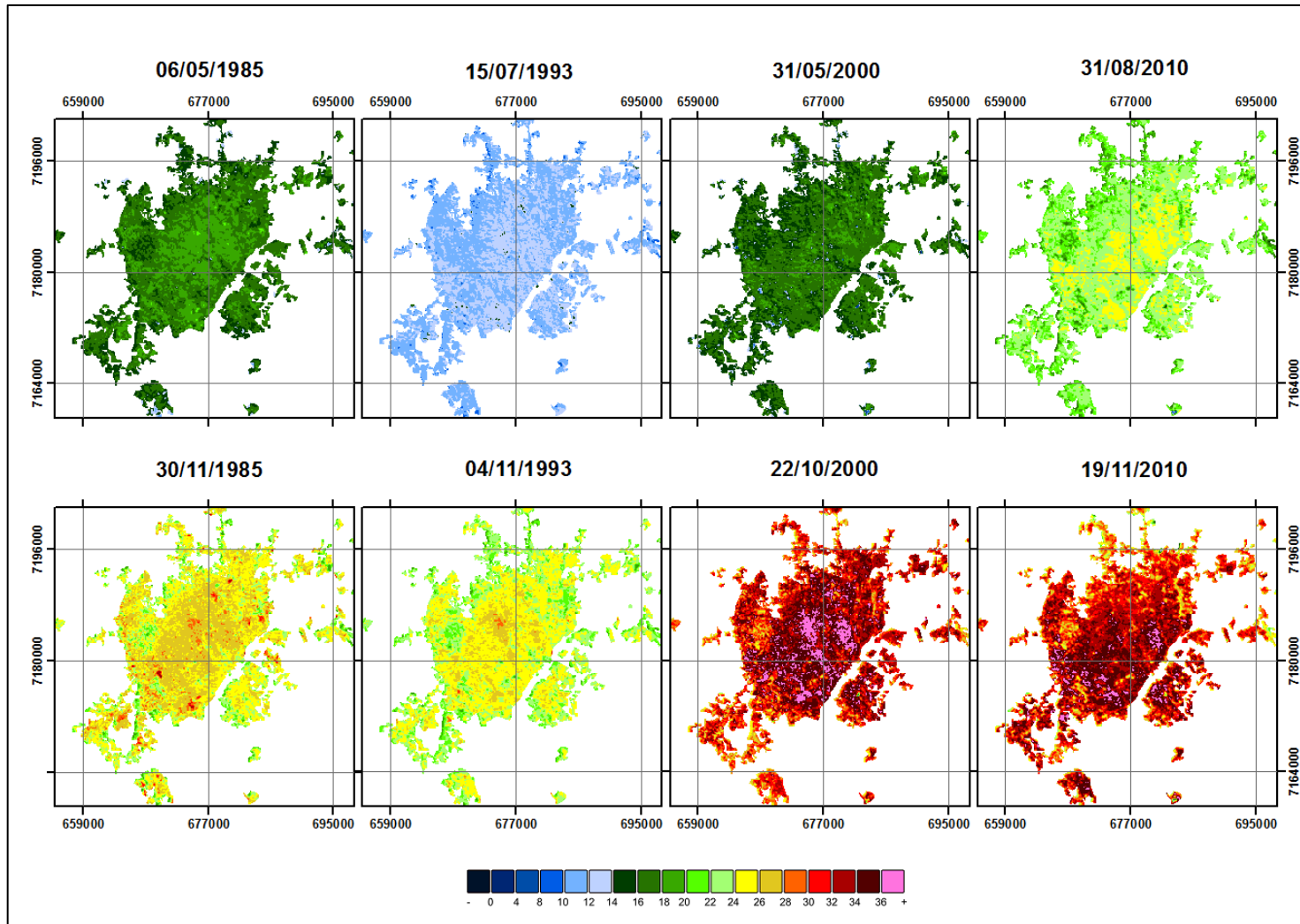


FIGURA 27 - SÍNTESE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE OBTIDA PARA OS ANOS DE 1985, 1993, 2000 E 2010

No entanto, ao observar a série de mapas elaborados neste trabalho, considera-se que as superfícies mais adensadas por material construído podem estar auxiliando na sustentação de TS mais elevadas devido à remoção e substituição da cobertura vegetal por áreas impermeabilizadas por concreto e asfalto, o qual é comprovado pela diferença da TS obtida entre as diferentes coberturas apresentadas nos cenários do subcapítulo 5.1.

Ressalta-se também que estas duas coberturas, vegetada e não vegetada, estão distribuídas de forma aleatória e heterogênea pelo AU-RMC. Além disso, estas coberturas possuem características retenção e emissão distintas entre si conforme a disponibilidade de insolação.

Neste sentido, o próximo capítulo visa discutir a resposta térmica de diferentes coberturas do ano de 2010 aplicando-se um zoom em algumas áreas que são representativas para o AU-RMC.

Este ano foi adotado por permitir uma melhor apreciação da cobertura da superfície considerando o uso de imagens com melhor resolução espacial como, por exemplo, a série histórica de imagens do *software* Google Earth Pro.

5.3. ANÁLISE DA TS EM DETALHE PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010

Para compreender a interação da superfície urbana e sua respectiva TS considerando dois níveis de insolação, ou seja, período de inverno e primavera selecionou-se quatro áreas com características de cobertura distintas que são representativas para todo o AU-RMC. Estas áreas possuem diferentes intensidades de adensamento urbano (alta, média, baixa e vertical) e áreas de campos e cobertura arbustiva e arbórea, as quais podem ser observadas em detalhe nos anos de 2009 e 2010, por meio do *software* Google Earth Pro.

Deste modo, optou-se em utilizar as imagens dos dias 31/08/2010 e 19/11/2010, para análise das áreas que estão delimitadas na FIGURA 28.

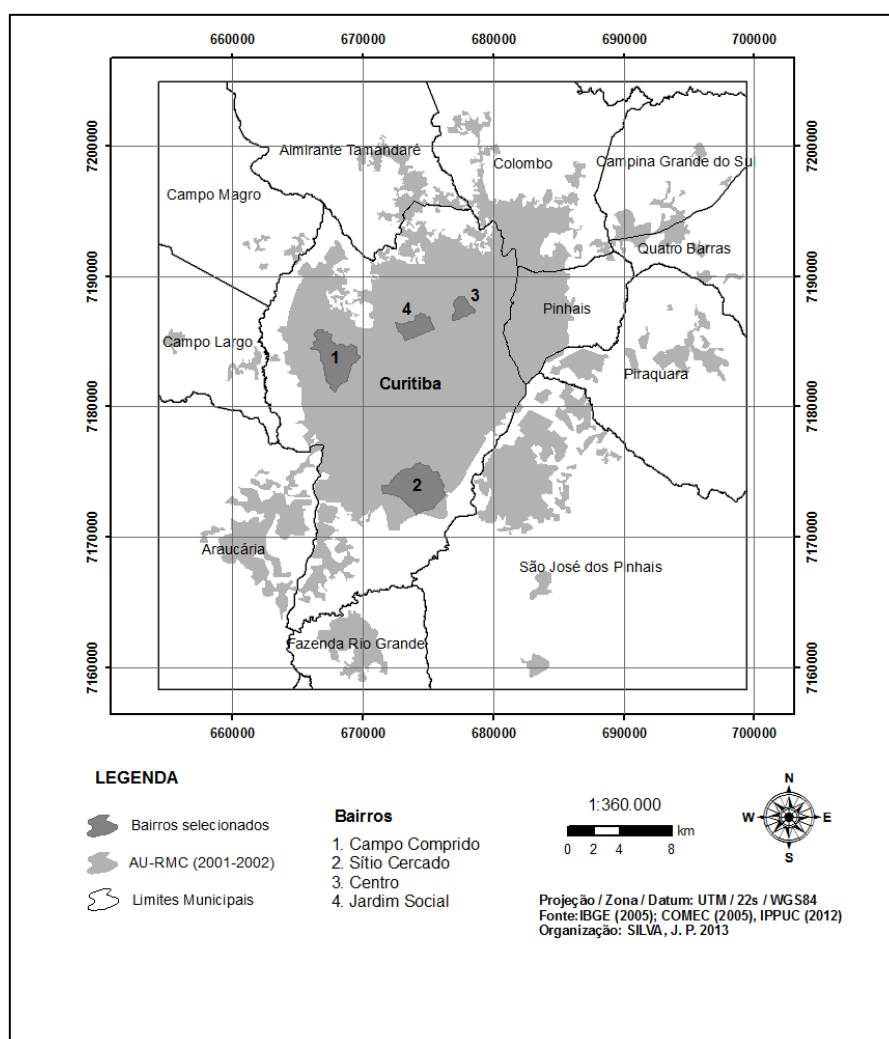


FIGURA 28 - BAIRROS DE CURITIBA SELECIONADOS PARA A ANÁLISE EM DETALHE DA TS DO AU-RMC PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010

A FIGURA 28 apresenta as áreas selecionadas para esta etapa, as quais correspondem aos limites dos bairros Campo Comprido (1), Sítio Cercado (2), Jardim Social (3) e Centro (4) que pertencem ao município de Curitiba. Optou-se por estas áreas devido a possibilidade de análise comparativa com as informações de densidade de população que estão disponíveis no *website* do IPPUC, as quais estão sintetizadas na TABELA 13.

TABELA 13 – DADOS DE OCUPAÇÃO DOS BAIRROS DE CURITIBA

BAIRRO	ÁREA (ha)	POPULAÇÃO (hab)	DENSIDADE (hab /ha)
Campo Comprido	856,98	28.816	33,62
Centro	328,30	37.283	113,56
Jardim Social	195,84	5.698	29,09
Sítio Cercado	1.119,96	115.525	103,15

FONTE: IPPUC/Banco de Dados (2013)

5.3.1 Análise do bairro Campo Comprido (Baixo Adensamento)

O bairro Campo Comprido foi selecionado para análise em detalhe por este apresentar a maior quantidade de cobertura vegetal dentro do AU-RMC, o qual pode ser observado em detalhe na FIGURA 29, pela composição RGB (itens 1A e 2A) e NDVI (itens 1B e 2B). Por preservar remanescentes florestais, o bairro Campo Comprido apresenta também as menores TS para todos os anos avaliados no capítulo 5.1.

Segundo dados disponíveis no *website* do IPPUC (2013), a população do bairro era de 6.817 hab em 1980, com densidade de 7,95 hab/ha, passando a 28.816 hab em 2010 e densidade de 33,62 hab/ha.

Analisando a FIGURA 29, observa-se que a imagem de TS do dia 19/11/2010 (item 2C), apresenta um gradiente térmico de 22 a 38°C, distribuído assim em nove classes.

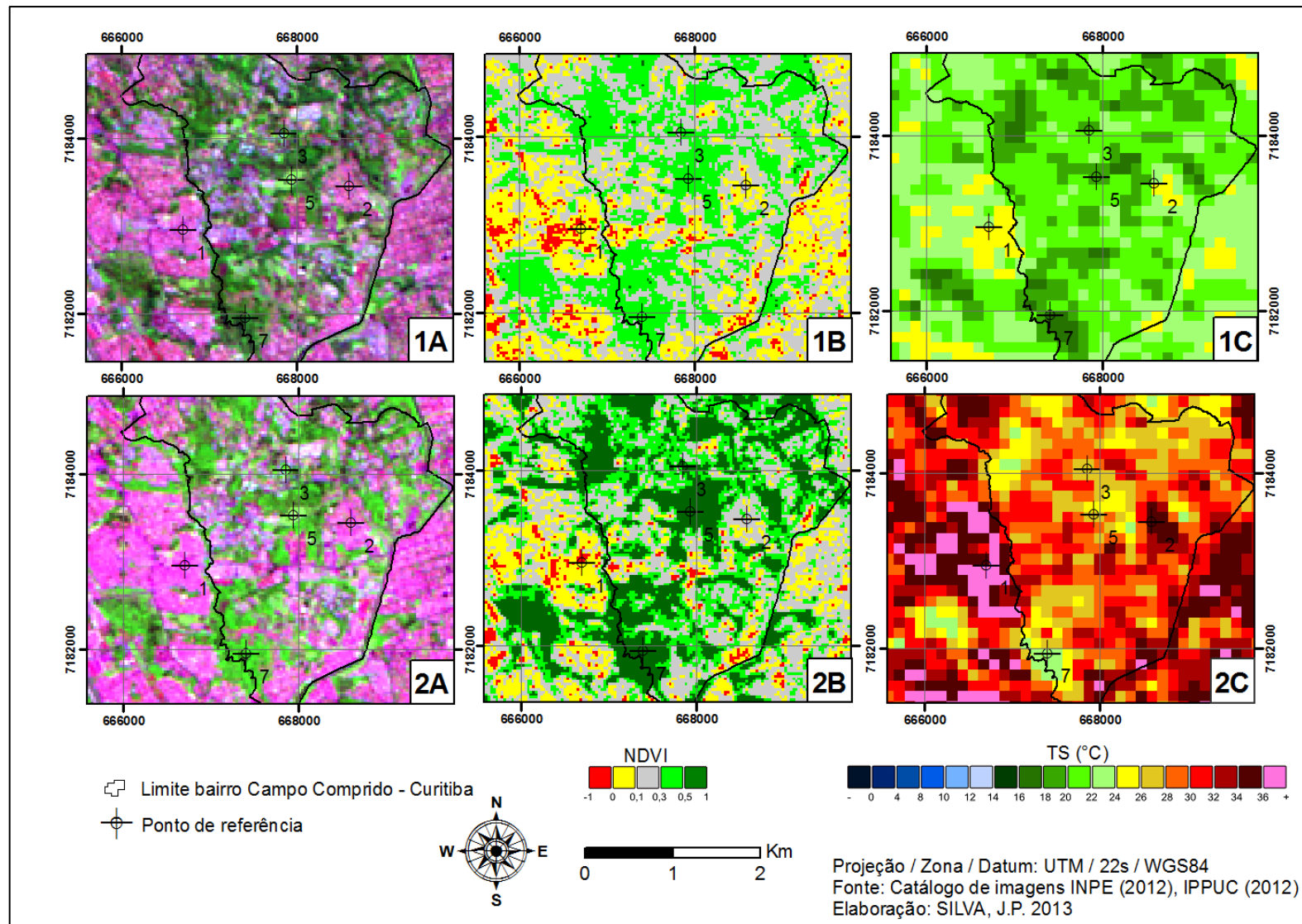


FIGURA 29 - COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO CAMPO COMPRIDO PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010

Legenda: As figuras da linha 1 correspondem ao dia 31/08/2010 (inverno) e as da linha 2 ao dia 19/11/2010 (primavera). A coluna A corresponde a composição RGB, a coluna B a imagem de NDVI e a coluna C identifica a TS. Os pontos do mapa são: (1) Alto adensamento horizontal, (2) Médio Adensamento, (3) Baixo Adensamento, (5) Campo, (7) Vegetação Arbórea.

A TS do dia 31/08/2010 (1C), apresenta um menor gradiente, com cinco classes térmicas representativas de 16 a 26°C.

Constata-se pela FIGURA 29, que no período inverno a TS tende a ser mais homogênea espacialmente que a TS de primavera, mesmo para áreas com características de menor adensamento urbano.

Os pontos identificados com o número 1 na FIGURA 29, fora da delimitação do bairro Campo Comprido, correspondem a áreas com ALTO ADENSAMENTO horizontal. As TS são mais elevadas para estes pontos nos dois períodos, ultrapassando os 34°C no dia 19/11/2010. No entanto, a vegetação presente no bairro, identificado pelos valores 0,3 a 1,0 (item 2B) amenizam as TS em relação aos bairros circundantes.

Os PONTOS 7 identificam as áreas com presença de VEGETAÇÃO ARBÓREA. Em ambos os períodos, os locais com cobertura vegetal apresentam as TS mais baixas.

O PONTO 3 corresponde a uma área com BAIXO ADENSAMENTO horizontal, a qual compreende moradias de alto padrão com áreas permeáveis e arborizadas. Durante o período de inverno apresenta TS (20-22°C), e no verão possui TS amenas (24 a 32°C) em relação às áreas circundantes.

Pelo item 2B observa-se um aumento no teor vegetativo da superfície em relação ao período apresentado item 1B. Durante o período de inverno, a baixa altura solar promove um maior sombreamento da superfície e redução da vegetação por consequência da queda de suas folhas. Desta maneira, também se identifica no item 1B uma maior quantidade de áreas em tom de vermelho (-1 a 0), caracterizando menor quantidade de biomassa.

Pelos itens 1B e 2B FIGURA 29, nota-se um aumento no NDVI relacionado à sazonalidade da vegetação. Comparando ao período anterior, onde a TA registrada foi de 17,5°C e a TS com intervalos de 14 a 18°C para as áreas vegetadas e de 22 a 26°C para as áreas edificadas, no dia 19/11/2010 as

TS para as áreas vegetadas foram de 23 a 26°C. Para as áreas edificadas a TS registrada foi de 25 a 35°C para uma TA de 21,8°C.

5.3.2. Análise do bairro Sítio Cercado (Alto Adensamento)

O bairro do Sítio Cercado se localiza na região sul da cidade de Curitiba. Em 1985, o bairro possuía 20.752 hab, densidade de 18,53hab/ha, passando para 115.525 hab em 2010 e densidade de 103,15 hab/ha.

A FIGURA 30 apresenta o recorte do bairro do Sítio Cercado para o ano de 2010. A paisagem urbana para este período compreende áreas de ALTO e MÉDIO ADENSAMENTO, respectivamente PONTOS 1 e 2.

Contraditoriamente, as áreas de campo e de cultura que emprestaram o nome para este bairro, essa área atualmente caracteriza-se como ambiente densamente urbanizada com edificações residenciais com até três andares com pouca presença de vegetação, com exceção dos PONTOS 5 e 7.

O bairro do Sítio Cercado, dentre todas as áreas observadas no AURMC, apresenta as maiores TS registradas.

A área que representa o PONTO 1 é constituída principalmente por edificações de pequeno porte, bastante adensadas entre si, com pouca vegetação o que pode ser comprovado pelos baixos valores de NDVI na FIGURA 30 (itens 1B e 2B).

A área que corresponde ao PONTO 2, diferente do PONTO1, apresenta residências menos adensadas com presença de ruas arborizadas e jardins entre as edificações. Deste modo, a TS é de 2 a 4°C mais baixa que as áreas com características similares a superfície do PONTO 1.

As TS mais amenas para o bairro são identificadas pelos PONTOS 5 e 7. A localidade identificada como PONTO 6 corresponde ao Centro de Treinamento do Atlético Paranaense. Essa área caracteriza-se pela presença de nove campos de futebol profissional e uma pequena parcela de áreas com vegetação arbórea e arbustiva.

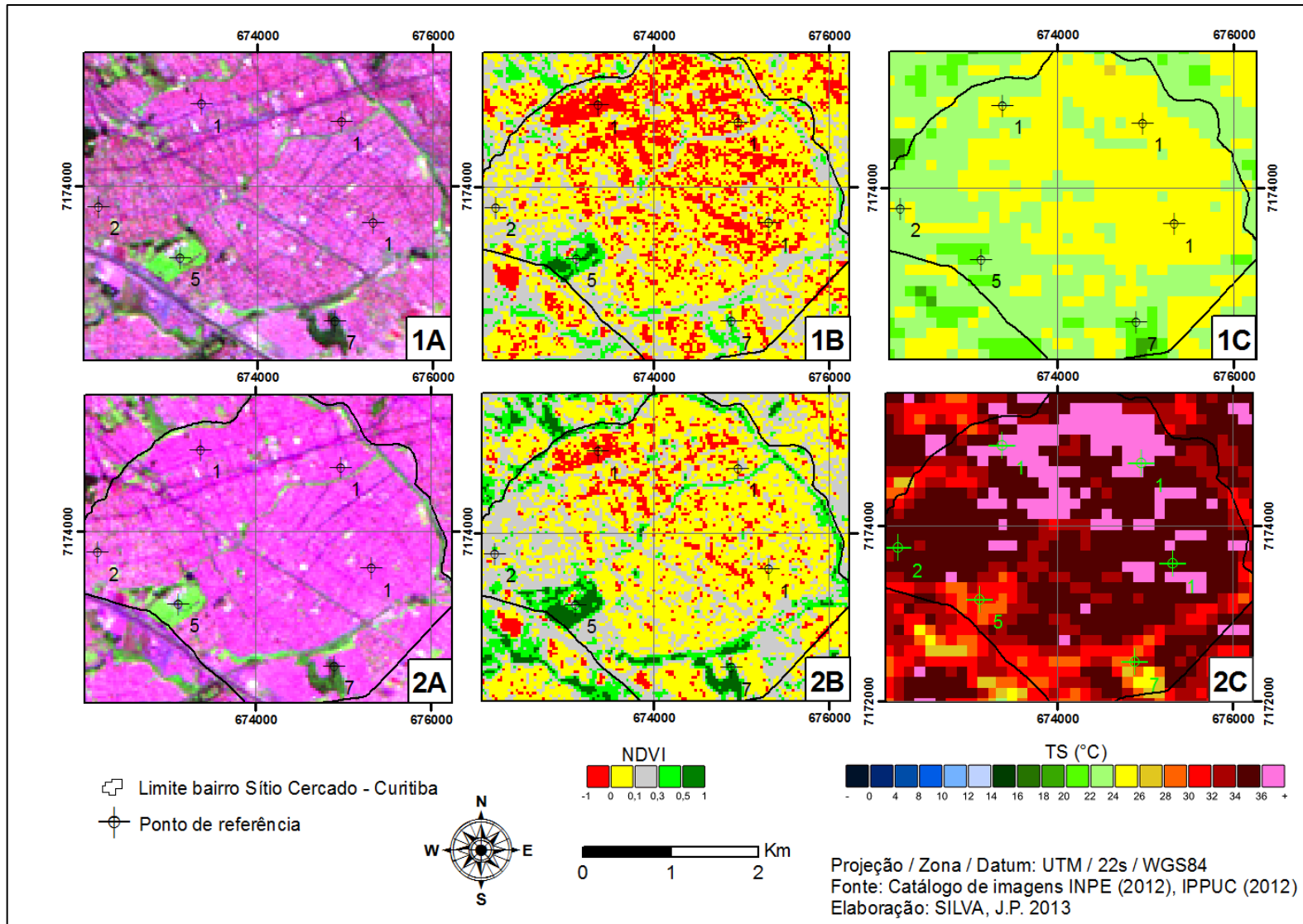


FIGURA 30 - COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO SÍTIO CERCADO PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010

Legenda: As figuras da linha 1 correspondem ao dia 31/08/2010 (inverno) e as da linha 2 ao dia 19/11/2010 (primavera). A coluna A corresponde a composição RGB, a coluna B a imagem de NDVI e a coluna C identifica a TS. Os pontos do mapa são: (1) Alto adensamento horizontal, (2) Médio Adensamento, (5) Campo, (7) Vegetação Arbórea.

O PONTO 7 nesta figura corresponde a uma área de remanescentes florestais, denominada bosque Sambaqui.

A maior quantidade de energia solar que incide sobre a superfície provoca um aumento da TS em todas as coberturas da superfície analisadas.

Desta forma, as superfícies dos PONTOS 1 e 2 preservam gradientes térmicos superiores até 2°C entre suas diferentes densidades de cobertura. A diferença dos valores de NDVI que pode ser observado nos itens 1B e 2B em relação às mesmas áreas nos itens 1C e 2C apresentam um contraste de até 10°C entre as coberturas vegetadas e não vegetadas.

Os PONTOS 6 e 8, maior NDVI nos itens 1B e 2B, combina com as baixas temperaturas de 19 a 23°C (item 1C e 2C). As áreas circundantes ao PONTO 2, com presença de vegetação (0,3 a 0,5) nos itens 1B e 2B, apresentam cerca de 1 a 2°C inferiores a média térmica da superfície para áreas ocupadas.

As áreas identificadas pelos PONTOS 1 apresentam áreas densamente ocupadas, com pouca vegetação. A forma de organização adensada das quadras para esta área do bairro favorece o surgimento de TS elevadas devido a alta capacidade calorífica do asfalto e concreto. A área que compreende o PONTO 2, com MÉDIO ADENSAMENTO, apresenta TS até 3°C inferiores a área do PONTO 1 fato que é proporcionado por uma mistura espectral das áreas arborizadas.

O dia 31/08/2010 caracterizou-se pelo predomínio de TS entre 23 a 26°C, e o dia 19/11/2010 com TS superiores a 33°C para essa área.

5.3.3. Análise do bairro Jardim Social (Médio Adensamento)

O bairro Jardim Social (FIGURA 31) foi um dos bairros que teve decréscimo populacional entre os anos de 1980 a 2010. Conforme dados do *website* do IPPUC (2013), o bairro Jardim Social possui uma população de 5.698 no ano de 2010, com densidade de 29,09 hab/ha. Em 1980 a população era de 7.049 com densidade de 35,99 hab/ha. De acordo com o zoneamento de 2000, o bairro se caracteriza como uma área residencial.

Observa-se pela FIGURA 31 que a TS do dia 31/08/2010 (item 1C) caracterizou-se com predomínio de intervalos de 22 a 25°C, e para o dia 19/11/2010 (item 2C), a TS obtida compreende o predomina valores entre o intervalo de 30 a 34°C.

Por apresentar características de MÉDIO ADENSAMENTO (PONTO 2), a TS tende a apresentar pouca variação dentro dos limites do bairro, com exceção do PONTO 1 que apresenta as TS mais elevadas devido a corresponder por uma área onde o projeto de arruamento é mais denso.

O projeto de arruamento, que compreende a largura das ruas sua arborização, o tamanho das quadras, além da presença de áreas verdes e baixa densidade de ocupação favorece o surgimento de temperaturas mais amenas do que as encontradas para as áreas mais adensadas discutidas na FIGURA 30 na p.145 e na FIGURA 32 p.150.

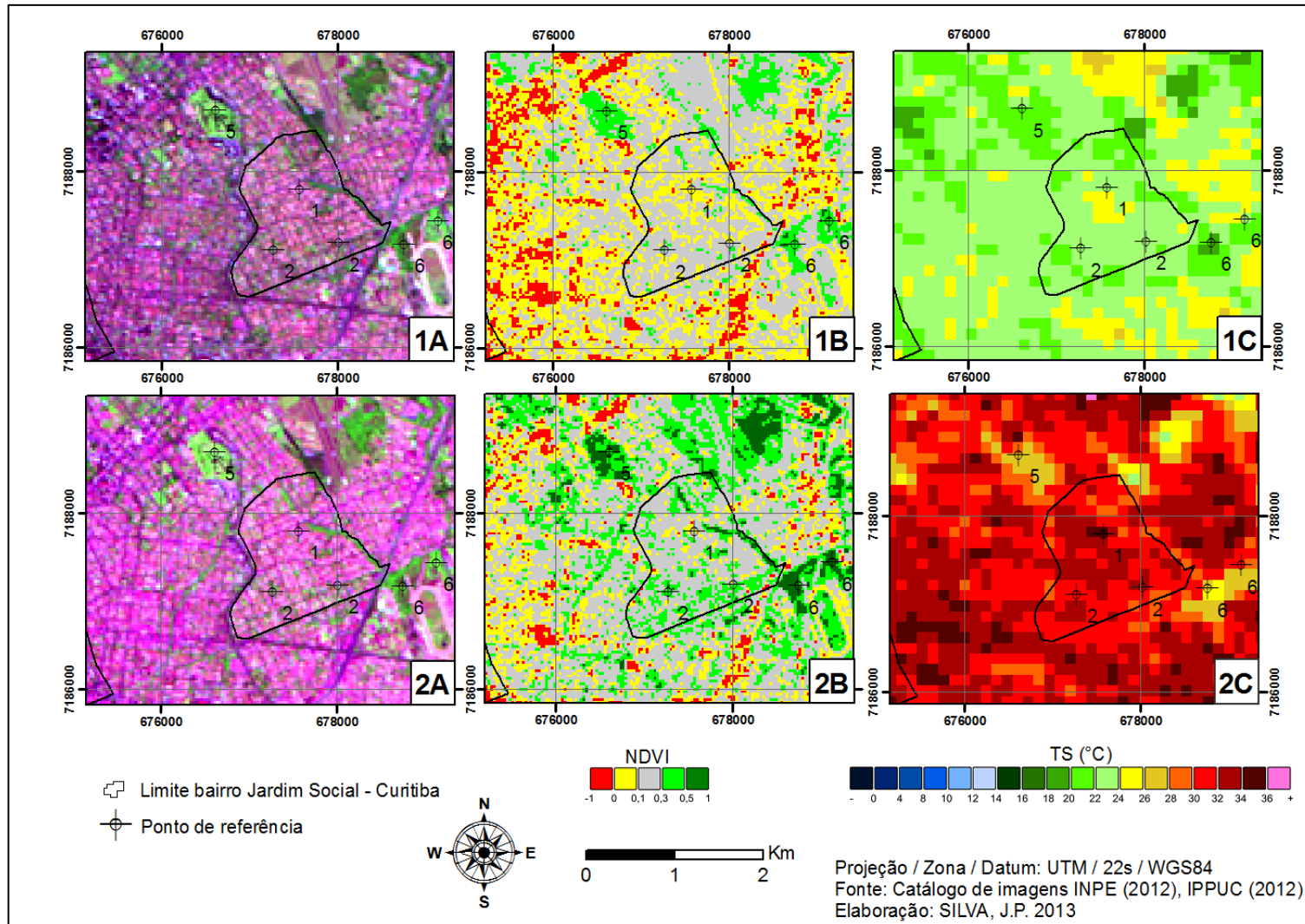


FIGURA 31 – COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO JARDIM SOCIAL PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010

Legenda: As figuras da linha 1 correspondem ao dia 31/08/2010 (inverno) e as da linha 2 ao dia 19/11/2010 (primavera). A coluna A corresponde a composição RGB, a coluna B a imagem de NDVI e a coluna C identifica a TS. Os pontos são: (1) Alto adensamento horizontal, (2) Médio Adensamento, (5) Campo, (6) Arbustiva.

5.3.4. Análise do bairro Centro (Adensamento Vertical)

Diferente das outras áreas analisadas deste capítulo, o bairro Centro da cidade de Curitiba se caracteriza por apresentar o maior adensamento vertical com até 40 pavimentos, conforme dados do *website* IPPUC (2013).

Em 1980, o bairro Centro possuía 42.371 hab, densidade de 129,06 hab/ha. Em 2010, segundo IPPUC (2013) a população é de 37.283 hab, com uma taxa de ocupação de 113,56 hab/ha. Apesar da redução de do número de habitantes, o bairro Centro se caracteriza como área comercial e de serviços.

Conforme a FIGURA 32, mais de 93,81% do bairro apresenta ausência de vegetação. Para esta área, as condições de cobertura da superfície, no caso a presença de edificações verticais de 4 a 30 andares (PONTOS 4) potencializa os efeitos diferenciados da TS em relação aos ambientes de baixo e médio adensamento. Durante o período de inverno, as TS do bairro CENTRO são mais baixas (18 a 24°C) do que o bairro Jardim Social (22 a 25°C). Fato potencializado pela projeção das sombras dos edifícios residências e comerciais sob a superfície circundante, o que reduz o valor do pixel captado pelo sensor. No período de primavera, onde a elevação do Sol é superior 62°, a TS do CENTRO é mais elevada (31 a 36°C) onde as edificações atuam como grandes armazenadores de calor pelas paredes de concreto.

O Passeio Público, identificado pelo PONTO 7 na FIGURA 32 como área arborizada, atua como uma ilha de frescor em relação área circundante. No dia 19/11/2010 a TS para este ponto exibe até 10°C abaixo da área circundante. No dia 31/08/2010 essa diferença cai para até 5°C.

A amplitude térmica da superfície do bairro CENTRO em 31/08/2010 variou de 20 a 26°C, sobre condições de TA de 17,5°C. Para o dia 19/11/2010 foi de 30 a 37°C com TA de 21,8°C registrada pela estação do SIMEPAR.

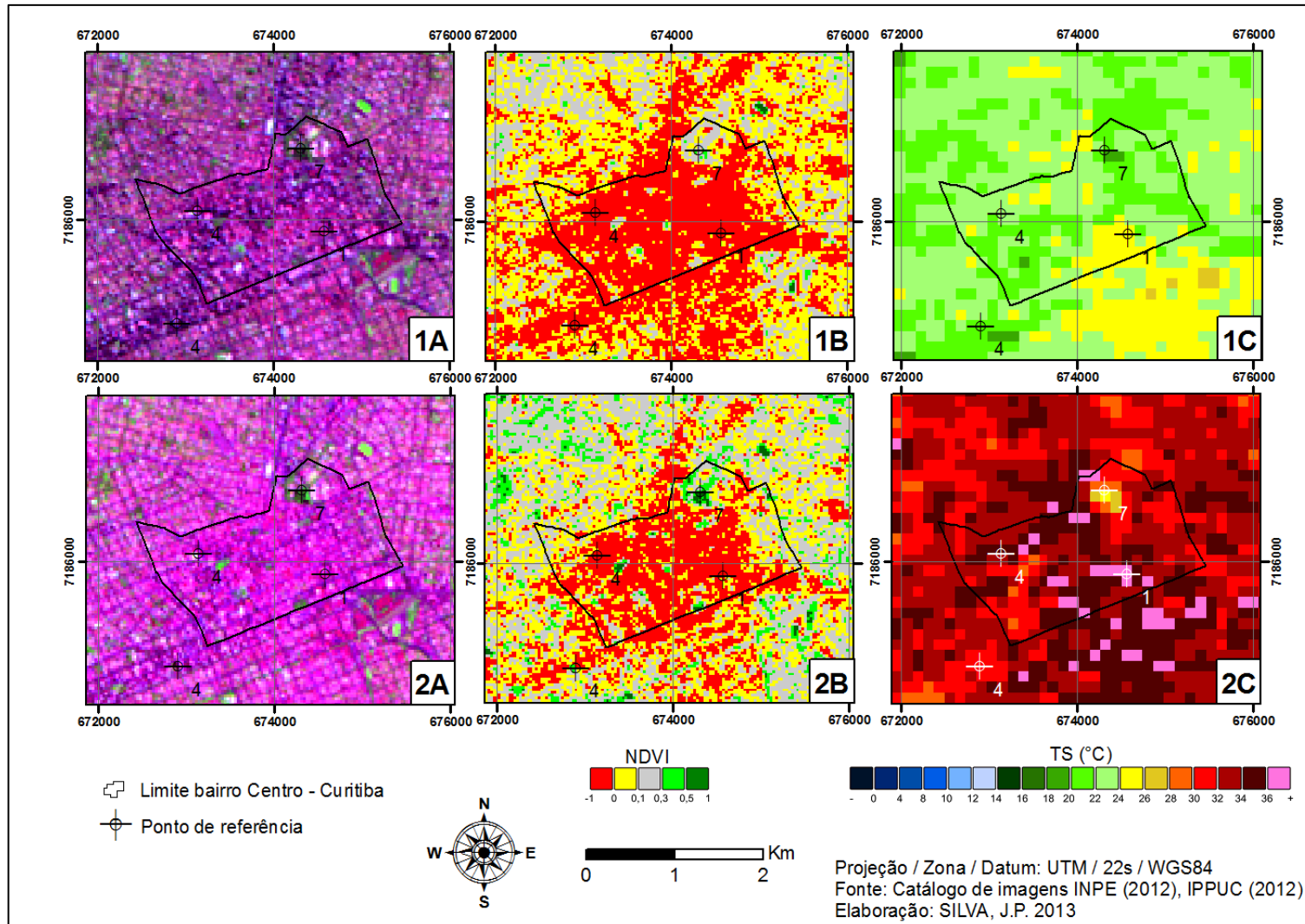


FIGURA 32 – COBERTURA DO SOLO, NDVI E TS DO BAIRRO CENTRO PARA OS DIAS 31/08/2010 E 19/11/2010

Legenda: As figuras da linha 1 correspondem ao dia 31/08/2010 (inverno) e as da linha 2 ao dia 19/11/2010 (primavera). A coluna A corresponde a composição RGB, a coluna B a imagem de NDVI e a coluna C identifica a TS. Os pontos do mapa são: (1) Alto adensamento horizontal, (2) Adensamento Vertical, (7) Vegetação Arbórea.

Pela análise em detalhe das áreas selecionadas para representar a TS do AU-RMC para os dias 31/08/2010 e 19/11/2010, constatou-se que:

- a) A cobertura vegetal proporciona os menores valores de TS em condições de baixa e como a maior insolação.
- b) As áreas de baixo e médio adensamento para os períodos analisados apresentaram o menor gradiente térmico entre as superfícies.
- c) As áreas de alto adensamento apresentam as TS mais elevadas, tanto para o dia de baixa e como de maior insolação.
- d) No dia 19/11/2010 todas as áreas apresentam maior gradiente térmico em relação ao dia 31/08/2010.

As áreas caracterizadas com maior adensamento vertical durante o dia de 31/8/2010, período de inverno, apresentam as TS mais baixas em relação as áreas de médio adensamento. Para o dia 19/11/2010, sob maior maior insolação, as TS são mais elevadas que as áreas de médio adensamento.

Os resultados discutidos neste capítulo corroboram com os encontrados por Collischonn (1998), Saydelles (2005), Andrade et al.,(2007), Coltri (2007), Fuckner (2008) e Moreira (2009), que não encontraram as TS mais elevadas em áreas densamente edificadas verticalmente, e sim em áreas com baixa cobertura vegetal e com edificações baixas cobertas por telhados de amianto densamente ocupadas e áreas impermeabilizadas como grandes estacionamentos e barracões industriais.

Além das características da superfície, outro fator importante para obtenção dos valores de TS por meio de sensoriamento remoto é a interferência da atmosfera. Neste sentido, no próximo subcapítulo são apresentados os resultados da TS obtida por meio de um modelo que permite corrigir os efeitos causados pela atmosfera, comparando estes resultados com os do método sem correção empregado neste trabalho no subcapítulo 5.1.

5.4. AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA NA IMAGEM TERMAL DO SENSOR TM/LANDSAT-5 PARA O DIA 19/11/2010

Com o intuito de investigar e se obter melhores resultados para a estimativa da TS do AU-RMC, foi avaliada a aplicação do modelo de correção atmosférica, utilizado por Coll *et al.*(2010), identificado como MCA. Posteriormente este método foi comparado com o modelo de estimativa de TS empregado por Collischonn (1998) o qual foi utilizado no subcapítulo 5.1, identificado neste capítulo como MSC. Este segundo método não emprega em seu cálculo o procedimento de correção atmosférica.

A TABELA 14 apresenta os resultados da TS obtidos para os dois métodos, conforme as classes de intervalos mais representativas.

TABELA 14 – DIFERENÇA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA EM 19/11/2010 COM RELAÇÃO AOS INTERVALOS ANÁLOGOS PARA OS MÉTODOS COM CORREÇÃO E SEM CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

INTERVALO	A - MSC	B - MCA
< 24	2%	1%
24,1 – 30	24%	15%
30,1 – 36	70%	49%
36,1 <	4%	35%

FONTE: O autor (2013)

Conforme a TABELA 14 observa-se divergência em área (%) entre os intervalos análogos da TS para os dois métodos.

Para o MCA a TS superior a 36°C representa 35% da área total do AU-RMC e MSC representa apenas 4%.

O intervalo de até 24°C apresenta pouca diferente entre os dois métodos, sendo 2% para MSC e 1% para o MCA.

Observa-se que o refinamento das técnicas empregadas pelo MCA, no caso a remoção dos efeitos causados pela absorção do vapor d'água presente na atmosfera, sugerem TS mais elevadas para o AU-RMC.

Deste modo, o MCA possibilita visualização de ilhas de calor de superfície (ICS) mais elevadas, que se destacam dentro da paisagem delimitada pelo AU-RMC em relação ao MSC.

As ICS são paisagens, que devido às suas peculiaridades armazenam maior quantidade de energia radiante do Sol em forma de energia térmica, apresentando assim TS superiores que as áreas circundantes.

Nestas ICS, onde a TS é mais elevada, tanto no MCA como no MSC são potencializadas principalmente pela forma, textura e densidade da cobertura da superfície que é característico de áreas urbanas mais adensadas, as quais possuem menor quantidade de vegetação e são densamente povoadas.

Destacam-se desta maneira, as características dos materiais como as coberturas de telhados de amianto, da forma da cobertura do solo como por conjuntos germinados que não possuem intervalo entre as edificações e áreas de estacionamento de veículos de asfalto e concreto, além da cobertura de supermercados, barracões e indústrias.

A FIGURA 33 apresenta de forma espacializada a distribuição da TS obtida para os dois métodos.

Com base nos resultados apresentados nos gráficos da FIGURA 33, observa-se pela TABELA 15 que o procedimento MCA proporcionou uma dispersão dos valores da TS em relação aos obtidos pelo MSC.

TABELA 15 – DIFERENÇA ESTÁTÍSTICA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PARA O DIA 19/11/2010 ENTRE OS MÉTODOS COM CORREÇÃO E SEM CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

MÉTODO	MÍNIMO (°C)	MÉDIA (°C)	MÁXIMA (°C)	AMPLITUDE TÉRMICA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)
MSC	6,73	31,82	48,52	41,79°C	3,21
MCA	2,92	33,7	53,6	50,68°C	3,85
Diferença	-3,8	1,93	5,12	8,89°C	0,65

FONTE: O autor (2013)

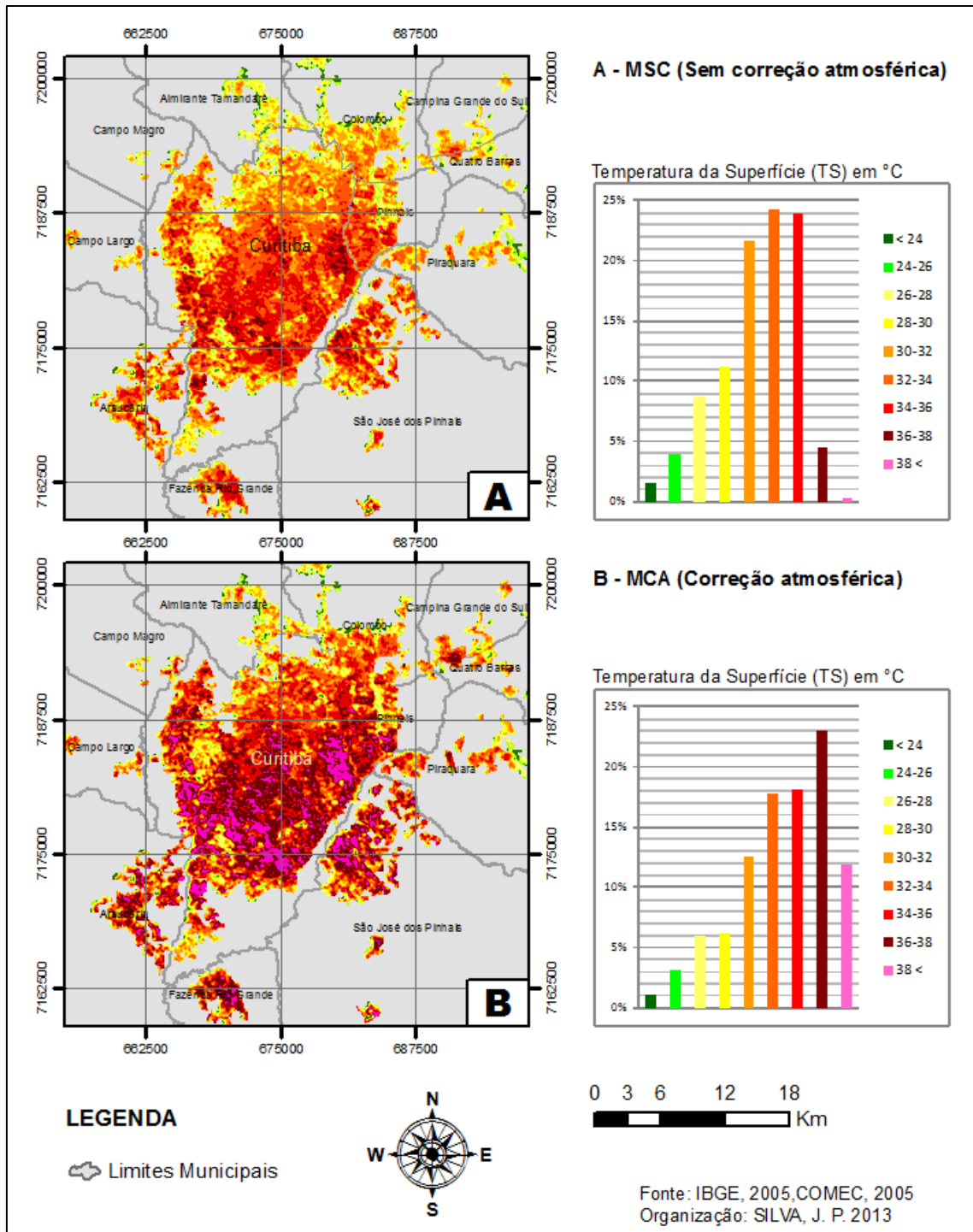


FIGURA 33 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PELOS MSC E MCA PARA O DIA 19/11/2010

Além da maior amplitude térmica obtida de 50,68°C pelo MCA, ou seja, de 2,92 a 53,6°C, o valor de pixel de TS mais elevado para este método é 4,82°C superior ao pixel mais elevado obtido pelo MSC.

Pelo histograma A da FIGURA 33, observa-se a concentração dos valores de TS do MSC entre 30 a 36°C. Os valores da TS do histograma B apresenta concentração de valores 32 a 38°C, ou seja, uma diferença de 2°C entre as principais classes de TS para os dois métodos.

Com o intuito de comparar a distribuição espacial destes valores pelo AU-RMC elaborou-se a FIGURA 34, que corresponde à subtração dos valores do mapa temático obtido pelo MCA sob o mapa do MSC.

A área em laranja no item C da FIGURA 34, região centro-sul do AU-RMC, concentra 52% da diferença térmica de superfície entre os dois métodos, onde a TS é de 2 a 3°C.

No item D estas áreas correspondem aos tons de roxo, são definidas como superfícies sem vegetação (SV), e nos tons de rosa e amarelo, onde se encontram os limiares inferiores de transição em (0,0 a 0,3) do NDVI.

Pela subtração dos valores da TS no item C (FIGURA 34) observa-se que as menores diferenças térmicas entre as duas metodologias correspondem principalmente às áreas onde a classe de NDVI são superiores a 0,3 em verde no item D.

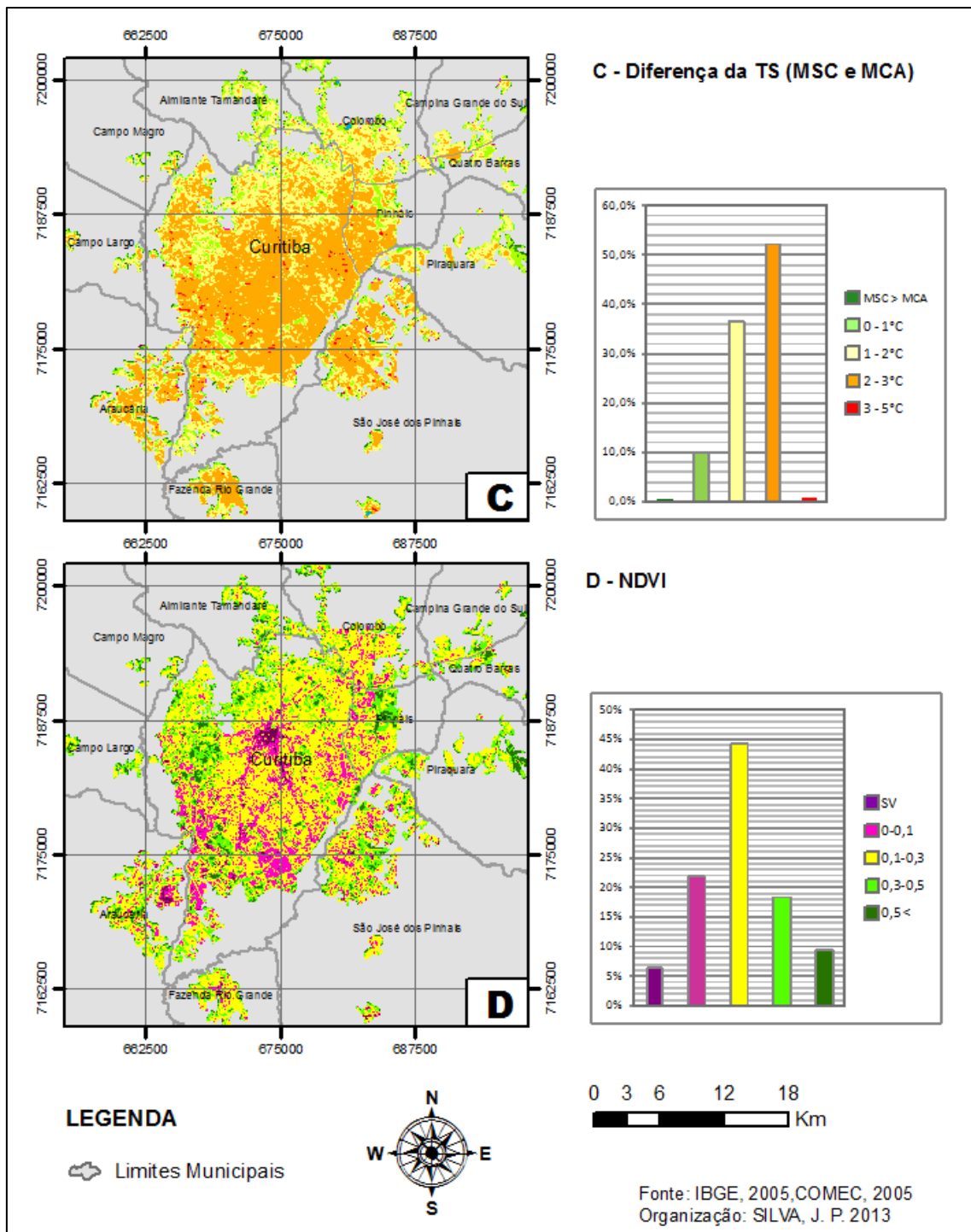


FIGURA 34 - DIFERENÇA DA TS OBTIDA PELOS MCA E MSC E SUA RELAÇÃO COM O NDVI PARA O DIA 19/11/2010

No geral, conforme pode ser observado na FIGURA 34, o processo de correção atmosférica permite um melhor detalhamento da intensidade das Ilhas de Calor de Superfície (ICS) na paisagem urbana. Considerando os valores

apresentados pelos dois métodos, cerca de 99,5% da área do AU-RMC pelo MCA (item B) possui TS superiores ao MSC (item A) da FIGURA 33.

Para os dois métodos as áreas que possuem cobertura vegetal, ou seja, onde o valor de NDVI é superior a 0,3 apresentam os menores valores de TS.

Deste modo, observa-se que a avaliação da cobertura vegetal e de sua ausência são parâmetros que devem ser considerados para análise da TS no ambiente urbano, uma vez que possuem capacidades distintas de emissividade e de armazenamento de energia.

Os resultados para os dois métodos demonstram que o refinamento da imagem térmica do TM/Landsat-5 pelo MCA propiciou a obtenção de valores de TS mais elevadas que o MSC.

Conforme Souza (2008), melhores resultados para estimativa TS podem ser obtidos a partir de modelos de correção atmosférica radioativa e emprego de radiossondas (balão meteorológico) para estimativa da transmitância atmosférica, que devem ser obtidos de preferência próximos do horário da passagem do sensor.

No entanto, os modelos empíricos podem proporcionar a estimativa da TS com até 1,2 K de diferença em relação aos modelos radioativos, conforme os resultados obtidos por Sobrino *et al.*, (2004) que avaliou três modelos com dados obtidos por radiossondas.

Por fim, apesar de ser modelo simples, o MSC permite a identificação de ICS de forma satisfatória para o AU-RMC, porém com menos detalhe espacial que o apresentado pelo MCA, considerando a diferença de 1 a 3°C entre os dois métodos para uma área de 89,23%.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A análise do comportamento térmico da superfície do AU-RMC para os anos de 1985, 1993, 2000, 2005 e 2010, por meio de imagens do sensor TM/Landsat-5, demonstrou potencial para a compreensão das relações entre a cobertura da superfície e a distribuição da TS pela paisagem urbana.

Neste sentido, os métodos de obtenção de TS e NDVI por processamento digital e a avaliação das condições meteorológicas permitiram à análise dos principais condicionantes que influenciaram a ocorrência e a distribuição para diferentes intensidades das ICS e IFS observadas no AU-RMC sobre variadas condições de insolação e cobertura do solo.

Como esperado, as modificações recentes na ocupação do solo urbano revelaram diferenças nos campos térmicos da superfície ao longo das últimas três décadas. Constatou-se deste modo um paralelo entre o crescimento do AU-RMC, com o surgimento de novos padrões térmicos pela superfície urbana.

Apesar dos gráficos para os anos de 1985, 1993, 2000 e 2010 (FIGURA 25 p.136 para outono/inverno e FIGURA 26 para primavera/verão p.137) apresentarem uma tendência de aumento da TS para o AU-RMC, não foi possível mensurar este aquecimento, uma vez que as imagens foram captadas em diferentes condições atmosféricas e de uso do solo (FIGURA 27 p. 138), representando assim, apenas um determinado instante da superfície. Uma comprovação eficiente seria quantificar esse aquecimento a partir de uma taxa de insolação igual para todos os períodos, não sendo admissível nesta pesquisa devido à inexistência destes dados.

A remodelagem da estrutura urbana, notada pela substituição dos espaços verdes e de áreas com baixo adensamento por áreas residenciais e comerciais mais adensadas e verticais, proporcionou o aumento da capacidade do AU-RMC em reter a energia radiante e transformá-la em energia térmica, fato que pode ser observado pela redução do NDVI entre os anos avaliados.

A análise temporal permitiu observar que as superfícies menos adensadas apresentaram as TS mais baixas em relação às superfícies mais adensadas durante todos os períodos. Este evento foi observado, sobretudo nas áreas onde o NDVI era superior a 0,1, ou seja, com presença significativa

de áreas verdes, principalmente por ruas arborizadas, áreas com jardins entre as edificações em locais com baixo e médio adensamento e áreas com presença de campos, vegetação arbustiva e arbórea. As áreas verdes, principalmente os parques, se caracterizaram como verdadeiras IFS dentro do aglomerado urbano.

Observou-se a existência de dois padrões térmicos para a superfície do AU-RMC em relação à sazonalidade para o mesmo ano. O primeiro padrão considera-se que em condições de baixa insolação, períodos de outono/inverno, as TS tendem a ser mais baixas e apresentar menor amplitude térmica entre os diferentes tipos de cobertura.

O segundo padrão, compreende os períodos de primavera/verão. O mesmo destaca-se durante os dias de maior elevação do Sol, ou seja, alta insolação, onde as superfícies mais adensadas apresentaram as TS mais elevadas e maior gradiente térmico em relação às áreas vegetadas e com menor adensamento.

Comparando as formas de uso da superfície em detalhe, observou-se que o centro da cidade de Curitiba, a qual apresenta maior quantidade de edificações verticais com até 40 andares e intenso uso de concreto e asfalto, revelou um comportamento diferenciado em relação às outras superfícies. Durante o período de inverno, ou seja, menor elevação do Sol, a TS do bairro Centro apresentou valores tão baixos quanto os valores das áreas de baixo e médio adensamento, respectivamente bairro Campo Comprido e Jardim Social. Para o dia com maior elevação do Sol, o bairro Centro apresentou a TS tão elevadas quanto às áreas caracterizadas com maior adensamento horizontal, para este recorte o bairro Sítio Cercado.

Observou-se durante os cenários avaliados que a TS contribui para manutenção da TA, ou seja, durante os dias de baixa insolação, a TA apresentou valor baixo e compatível com a TS para grande parte da área de estudo. Com exceção do dia 15/07/1993 onde a TA registrada foi aproximada de 3°C para as 9h00.

Em dias de maior insolação, a TS apresentou ICS com valores superiores a TA registrada pelas estações meteorológicas. No entanto, as

áreas com TS mais baixas possuem temperaturas próximas a TA registrada para as 9h00 e 10h00 pelas estações meteorológicas.

A obtenção da TS por sensoriamento remoto não permite estimar toda a TS urbana devido a restrições impostas pela geometria e heterogeneidade destas áreas. Desta maneira, as técnicas existentes ainda carecem de uma melhor precisão para estimar a TS em áreas que são sombreadas pela projeção das edificações no momento da passagem do sensor, bem como, por técnicas que permitam a extração das informações da superfície conforme a influência da estação do ano, alternância do ângulo solar e intensidade da radiação eletromagnética recebida.

Na comparação entre os métodos MCA e MSC para o dia 19/11/2010 para AU-RMC, observou-se uma diferença de 1 a 2°C para 36% da área, a qual corresponde espacialmente ao NDVI (0,1 a 1,0), e de 2 a 3°C para 52% da área, que satisfaz espacialmente as áreas cujo NDVI (-1,0 a 0,1).

No entanto, um problema que é pouco mencionado na literatura é a confiabilidade da correção atmosférica para áreas que apresentam heterogeneidade de uso e ocupação do solo. A maioria dos trabalhos consultados que utilizam a correção atmosférica para o sensor TM/Landsat-5 são empregados em áreas homogêneas, ou seja, supõe-se que a emissividade é conhecida (homogênea), como por exemplo, Qin *et al.* (2001) que estimou a TS do deserto entre Israel e Egito com dados atmosféricos corrigidos.

Deste modo, a investigação do parâmetro correção atmosférica ainda carece de métodos que subsidiem a validação em áreas que apresentem certa heterogeneidade, devendo assim ser melhor explorado com o objetivo de auxiliar novos estudos em áreas urbanas, as quais apresentam maior diversidade de materiais em superfície.

Contudo, para ambos os métodos, ressalta-se a necessidade que em trabalhos futuros, os valores apresentados sejam validados no momento da passagem do sensor em campo, de forma a garantir maior confiabilidade dos dados obtidos pelos dois métodos.

Devido à escala adotada neste trabalho não foi contemplado a análise da orientação das vertentes e sua relação com as TS obtidas. Entretanto, entende-se a importância deste parâmetro para os estudos de topoclima e

microclima, onde a disposição das faces das vertentes do relevo podem indicar temperaturas diferenciadas de acordo com o período do ano, principalmente quando a morfologia das vertentes favorece a maior captação de energia proveniente do Sol.

A adoção de parâmetros para avaliação do estado da superfície, como NDVI empregado neste trabalho, sugere apenas resolução de uma parte dos problemas encontrados para compreensão da TS. A elaboração de outros índices pode auxiliar na melhor interpretação dos componentes da superfície que contribuem para o aumento da TS urbana.

Os resultados deste trabalho não revelam um aumento da TA em paralelo com o crescimento do AU-RMC e sim um aumento dos padrões térmicos da superfície urbana, ou seja, o aumento da capacidade da superfície em armazenar energia térmica conforme as modificações espaciais ao longo do processo de formação da mancha urbana entre os períodos estudados.

Desta maneira, entende-se que o aumento da mancha urbana tem significativa importância na sustentação de TA's mais elevadas junto à superfície que devem ser investigadas a partir do desenvolvimento de novos métodos, juntamente com o emprego de dados de estações meteorológicas e cartas sinópticas.

Outros assuntos relevantes que ainda carecem de estudos e/ou melhor detalhamento são os efeitos causados pela emissividade dos materiais e rugosidade edificada da superfície urbana.

Apesar das limitações ainda não superadas, os resultados se mostraram satisfatórios, uma vez que os recursos disponíveis neste trabalho, permitiram a observação do papel das propriedades físicas dos materiais superficiais e do seu arranjo nos espaços intraurbanos para definição do campo térmico do AU-RMC, fornecendo desta maneira subsídios para investigação do clima urbano de outras cidades com características semelhantes.

7. REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E. H. **Sensoriamento remoto da temperatura e dos fluxos de calor na superfície da água do reservatório de Itumbiara (GO)**. 162 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – INPE. 2010

ANDRADE, L.L.; SOUZA, L.H.; SAKURAGI, J.; CASTRO, R.M. Estudo de ilhas de calor na cidade de São José dos Campos utilizando o canal infravermelho termal do Landsat-5 e o aerotransportado HSS. . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 473-480.

ANDRADE, L. L. **Estimativa da temperatura e emissividade com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System) e suas relações com materiais urbanos**. 128 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2011.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os Trópicos**. 9. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 332 p.

BALISKI, P. **A conformação do espaço industrial e a expansão da mancha urbana no aglomerado metropolitano de Curitiba: 1955-2008**. 184 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná. 2011.

BAPTISTA, G.M.M. Estudo Multitemporal do fenômeno Ilhas de Calor no Distrito Federal. **Revista Meio Ambiente**. n. 02, p. 03-17, 2002.

BARSI, J. A., SCHOTT, J. R., PALLUCONI, F. D., HELDER, D. L., HOOK, S. J., MARKHAM, B. L., CHANDER, G., & O'DONNELL, E. M. (2003). **Landsat TM and ETM+ thermal band calibration**. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(2), 141-153.

BASTIAANSEN, W. G. M. **SEBAL – based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin**, Turkey. Journal of Hydrology, v. 229, p. 87-100, 2000.

BECKER, F.Z.-L.LI. Toward a Local Split-Window Method Over Land Surfaces. Int. Journal Remote Sensing, v 11, n, 369-393, 1990.

BERTALANFRY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**. Trad. Francisco M. Guimarães. Petrópolis, Vozes, 1973.

CASTRO NETO, V. Grande Curitiba: um olhar sobre a evolução urbana. Metropolis em revista, Curitiba, v.4, n.1, p.15-27, 2002.

CHANDER, G; MARKHAM, B; HELDER, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**. V .113. p. 893-903. 2009.

CHAVEZ, P. S. Jr.: An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment** 24, 459 - 479, 1988.

COLL, C.; GALVE, J.M.; SÁNCHEZ, J.M.; CASELLES, V. Validation of Landsat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction With Ground-Based Measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, V 48, n° 1, January, 2010.

COLLISCHONN, E. **O campo térmico da Região Metropolitana de Porto Alegre: Uma Análise a partir da Interação das Variáveis Ambientais na Definição do Clima Local.** 155f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

COLTRI, P. **Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: análise de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto.** 166 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

COMEC – Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. **Plano de Desenvolvimento integrado da Região metropolitana de Curitiba:** propostas de ordenamento territorial e novo arranjo institucional. Curitiba: COMEC, 2006. 303 p.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. **A cidade de Curitiba e a poluição do ar: implicações de seus atributos urbanos e geocológicos na dispersão de poluentes em período de inverno.** 330 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial.** 453 p. Madrid. Rialp, 1990.

DASH, P. GOTTSCHKE, F. S., OLESEM, F. S. & FISCHER, H. Landsat surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practicecurrent trends. **International Journal of Remote Sensing**, 23, 2563 - 2594, 2002.

DESCHAMPS, M. V. **Vulnerabilidade socioambiental na região metropolitana de Curitiba.** 155 p. Tese (Doutorado Meio Ambiente) – Universidade Federal do Paraná. 2004.

DUMKE, E. M. S. **Clima urbano / conforto térmico e condições de vida na cidade – uma perspectiva a partir do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba (AU-RMC).** 417 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

EPA. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of strategies**. Urban Heat Island Basics. 2011. p. 1-22.

Disponível em: <http://www.epa.gov/heatisd/resources/compendium.htm>.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia prática**. Editora Oficina de Textos, 2006. 188p.

FIRKOWSKI, O. L. C. de F.; MOURA, R. **Regiões metropolitanas e metrópoles. Reflexões acerca das espacialidades e institucionalidades no Sul do Brasil**. Revista RA'EGA, n. 5, p. 27-46, 2001.

FIRKOWSKI, O. L. C. de F. **A nova lógica de localização industrial no aglomerado metropolitano de Curitiba**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, IPARDES, n. 103, p. 79-100, 2002.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto: Imagens de Satélite para estudos ambientais**. 2 ed. Oficina de Textos, 2007. 101p.

FOLHES, Marcelo Theophilo. **Uma aplicação da banda termal do TM/Landsat-5 no gerenciamento dos recursos hídricos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 16-21 abril 2005. *Anais do...* Goiânia: INPE, 2005, p. 3009-3016.

FUCKNER, M. A. **Aplicação de Imagens ASTER no Estudo do Ambiente Urbano de São Paulo e Rio de Janeiro**. 2007. 230 p. (INPE-15203-TDI/1303). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: Como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. Tradução de Sílvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 223p, 2010.

GUSSO, A; FONTANA, D. GONCALVES, G. A. **Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com uso do sensor AVHRR/NOAA**. *Pesq. agropec. bras.* [online]. 2007, vol.42, n.2, pp. 231-237. ISSN 0100-204X.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil. 2005.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Ipeadata**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>> Acessado em: 12 de outubro de 2013.

IPPUC - Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. **Curitiba em dados**. Disponível em: <<http://ippucnet.ippuc.org.br>> Acessado em: 19 de dezembro de 2012.

ITCG – Instituto de Terras, Cartografia e Geociências.

Disponível em: <<http://www.itcg.pr.gov.br>> Acessado em: 13 de junho 2012.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 2 ed. Parêntese Editora. Tradução: José Carlos Neves Epiphânio. 592 p. 2011.

JIMÉNEZ-MUNOZ, J. C., SOBRINO, J. A., 2003. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, vol. 108. n. 22, pp. 2-9.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL). California Institute of Technology. **ASTER overview**. Disponível em: <<http://edcdaac.usgs.gov/aster/asteroverview.asp>>. Acessado em: 16 de maio de 2013.

LAZARIM, C. G.; ZULLO JUNIOR, J. Estimativa da temperatura da superfície terrestre, destinada ao monitoramento agrometeorológico de dias com temperaturas elevadas, utilizando dados do sensor AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 0078-0084.

LIANG, S.; FANG, H.; CHEN, M.: Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land, Surface Imagery – Part I: Method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 39, 2490 - 2498, 2001.

LEAL, L. **A influência da vegetação no clima urbano da cidade de Curitiba – Pr**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. 2012.

LIMA, C. A. **A ocupação de área de mananciais na Região Metropolitana de Curitiba: do planejamento à gestão ambiental urbana-metropolitana**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000. 359f.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.

LIU, L.; ZHANG, Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong. **International Journal of Remote Sensing**, v 3, 1535-1552, 2011.

LU, D. P. M.; BRONDIZIO, E. & MORAN, E.: Assessment of atmosphere correction methods for Landsat TM data applicable to amazon Basin LBA research. **International Journal of Remote Sensing**, 23, 2651 - 2671, 2002.

MARKHAN, B.L.& BARKER, J.L.: Landsat MSS and TM Post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectance and at-satellite temperatures, **Eosat Landsat TechNotes**, 1, 3 - 7, 1986.

MENDONÇA, F. 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, 1994.

MENDONÇA, F. A. (Org). **Impactos socioambientais urbanos**. Curitiba-PR. Editora UFPR, 2004. 328p.

MENDONÇA, F; DUBREUIL, V. **Termografia de superfície e temperatura do ar na RMC (região metropolitana de Curitiba/PR)**. R. RA´EGA. n. 9, p. 25-35, 2005.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. v. 1. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206p.

MESQUITA, F.L.L. **Monitoramento do balanço de radiação na região metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – PPGM-IGEO-CCMN, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. A.; (Orgs.). **Clima Urbano**. São Paulo-SP: Contexto, 2003. 192p.

MOREIRA, E. B. M. **Variação espacial e multitemporal das temperaturas à superfície na cidade do Recife**. Recife, 2009, 98p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Ciências Geográficas – Coordenação de Pós – Graduação em Geografia.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2007. 314 p.

MOREIRA, M. A., SHIMABUKURO, Y. E.: **Aplicações Ambientais Brasileiras dos Satélites NOAA e TIROS**, 2004. p. 79-101.

MOURA, R. Paraná: meio século de urbanização. **RA´E GA**, Curitiba: Editora UFPR, n. 8, 2004, p. 33-44.

MOURA, R. **Arranjos urbano-regionais no Brasil: uma análise com foco em Curitiba**. 2009. 242f. Tese (Doutorado em Ciências da Terra) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

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.

NICHOL, J. E. High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, n. 1, p. 135-146, Jan. 1996.

NOVO, E. M. L de M, **Sensoriamento Remoto**: Princípios e Aplicações. 2ª ed, São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1998, 308p.

NUCCI, J. C.; CAVALHEIRO, F. **Cobertura vegetal em áreas urbanas: conceito e método**. GEOUSP, n.6, p. 29-36, 1999.

OLIVEIRA, M. J.; VECCHIA, F.; MONTAÑO, M. **Mapeamento da temperatura de superfície de pequenas bacias hidrográficas: comparação de imagens dos satélites LANDSAT 5, LANDSAT 7 e CBERS 2 no estudo de caso do Córrego da Água Quente, São Carlos, SP**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 763-770.

OKE, T. R. The energetic basic of the urban heat island. **Quartely Journal of Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 108, p. 1-24, 1982.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2 ed. Methuen, 1987. 289 p.

OKE, T. R. The micrometeorology of the urban forest. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.**, v. 324, p. 335–349, 1989.

PILOTTO, A. S. **Área metropolitana de Curitiba: um estudo a partir do espaço intraurbana**. 196 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

QIN, Z., 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. **International Journal of Remote Sensing**, 22, 3719 - 3746, 2001.

ROSA, L. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Uberlândia: Edufu, 2009. 264p.

ROSSI, F. A. **Análise da influência da ocupação do solo na variação de temperatura em diferentes localidades da cidade de Curitiba**. 166 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2004.

ROTH, M.; OKE, T.R.; EMERY, W.J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.10, p.1.699-1.720, 1989.

SANTOS, N. B. F. **Distribuições espaciais e temporais de superfície no Bioma Cerrado: uma análise integrada a partir de dados orbitais de resolução moderada**. 94 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás. 2010.

SAYDELLES, A.P. **Estudo do campo térmico e das ilhas de calor urbano em Santa Maria**. 2005, 219f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SCHUSSEL, Z. G. L. **A aglomeração metropolitana da Curitiba e as tendências contemporâneas do planejamento urbano**. 2006. 348f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos**: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais. Tese de doutorado. UFPR. Curitiba, 2010.

SOBRINO, J. A.; JIMENEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L.: Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, 90, 434 - 440, 2004.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; LENNEY, M. P. & MACOMBER, S. A.: Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? **Remote Sensing of Environment**, 75, 230 - 244, 2001.

SOUSA, D. O.; BAPTISTA, G. M. M. Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4525-4530.

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

SOUZA, J. D.. Modelo Físico-Matemático de correção atmosférica para imagens TM-Landsat 5 MODIS-TERRA/AQUA. **Tese de Doutorado, CCT/UFPb**, Campina Grande, Pb, 2008, 177p.

STEINKE, E. T. **Considerações sobre a variabilidade e mudança climática no Distrito Federal, suas repercussões nos recursos hídricos e informação ao grande público**. 201 p. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade de Brasília. 2004.

TASUMI, M., ALLEN, R. G., & TREZZA, R.: "Estimation of at surface reflectance and albedo from satellite for routine, operational calculation of land surface energy balance." **Journal Hydrology. Eng.** 2007.

TRENTIN, R.; DEPPE, F.; LOHMANN, M.; GRASSI, J. T. Análise comparativa da temperatura de superfície MODIS e temperatura do ar em diferentes situações no estado do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 7745-7752.

ULTRAMARI, C.; MOURA, R. (Org.). **Metrópole: Grande Curitiba: teoria e prática**. Curitiba: IPARDES, 154 p.1994.

VALOR, E. & CASELLES V.: Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and south american areas. **Remote Sensing of Environment**, 57, 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 of Remote Sensing**, 14, 1119 -1131, 1993.

VICENTE, L. E.; SOUZA FILHO, C. R. **Detecção de quartzo de e argilominerais para o monitoramento de degradação de Terras a partir de dados Infravermelho termal do sensor ASTER** .Rev. Bras. Geof. [online]. 2010, vol.28, n.2, p. 229-247.

VIEIRA, C. H. S. D. **Estudo da dinâmica da cobertura vegetal de Curitiba/PR com o uso de imagens digitais**. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

VILLAÇA, F. **Espaço intra-urbano no Brasil**. 2. Ed. São Paulo. Studio Nobel. FAPESP, 2001.

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. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n.10, p. 1999-2014, 2001.

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. 2004.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 64, p. 335_344. 2009.

XIAN, G.; CRANE, M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.104, p.147-156. 2006.