



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL**

JANILCI SERRA SILVA

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E
IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR NO MUNICÍPIO DE PAÇO DO
LUMIAR (MA)**

João Pessoa-PB
Março de 2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL**

JANILCI SERRA SILVA

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E
IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR NO MUNICÍPIO DE PAÇO DO
LUMIAR (MA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: **Prof. Dr. Richarde Marques da Silva**

Área: **Engenharia Urbana**

Linha: **Planejamento e Engenharia Urbana: Interações**

João Pessoa-PB
Março de 2016

S586a Silva, Janilci Serra.
Análise multitemporal do uso e ocupação da terra e
identificação de ilhas de calor no município de Paço Lumiar
(MA) / Janilci Serra Silva.- João Pessoa, 2016.
128f. : il.
Orientador: Richarde Marques da Silva
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia civil e ambiental. 2. Engenharia urbana.
3. Urbanização. 4. Sensoriamento remoto. 5. Índices de
vegetação. 6. Temperatura de superfície.

UFPB/BC

CDU:624:504(043)

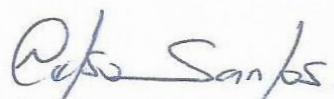
**ANÁLISE MULTITEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E
IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR NO MUNICÍPIO DE PAÇO DO
LUMIAR (MA)**

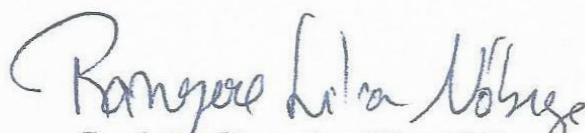
JANILCI SERRA SILVA

**Dissertação aprovada em 31 de março de 2016
Período Letivo: 2015.2**

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Richarde Marques da Silva - UFPB
Orientador


Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Examinador Interno


Prof. Dr. Ranyere Silva Nóbrega
Examinador Externo

**João Pessoa/PB
2016**

Dedicatória

Às pessoas que souberam dar-me a direção para
trilhar os meus caminhos, que me ensinaram
a lutar por meus objetivos na vida
e a ver ao próximo com ternura,
minha mãe Rubenita Serra e meu pai João Dutra.
Às pessoas cuja simplicidade me inspira a cada
dia, e não permite que eu esqueça jamais minhas origens,
meus avós Terezinha Serra e Saturnino Serra.
A vocês todo o meu amor e admiração.

AGRADECIMENTOS

O longo do período que levou à realização desta pesquisa tive o privilégio de ter conhecido pessoas fantásticas, e sem elas não teria sido possível chegar até aqui. Tive também a satisfação de mais uma vez poder contar com pessoas que sempre estiveram presentes em minha vida. “*A gratidão é sem dúvida o sentimento mais nobre que existe*”. Aqui expresso minha imensa gratidão...

- Ao Ser supremo, por iluminar meus caminhos sempre. Agradeço por colocar na minha vida amigos e familiares que são fundamentais na minha jornada aqui na Terra.

- À minha mãe Rubenita Serra e meu pai João Dutra, que sempre primaram por minha educação, agradeço por toda ajuda na superação dos desafios e por suas orientações na minha formação de ser humano com disciplina e respeito ao próximo. Vocês são o culminar perfeito da minha vida. Amo vocês incondicionalmente!

- Aos meus avós Saturnino Serra e Terezinha Serra, pelo apoio ao longo desta jornada, grata pelo carinho e todo amor com o qual sempre me recebem em seu lar. Posso trilhar qualquer caminho nessa vida, mas sempre vou desejar retornar pra perto de vocês.

- Ao meu orientador, professor Richarde Marques da Silva, por todos os conhecimentos transmitidos e o espírito crítico que foram fundamentais para a concretização deste estudo. Minha gratidão pela confiança e por me ensinar novos caminhos na pesquisa. Foi intensamente contagiante vê-lo “fazer” ciência!

- Aos professores Celso Augusto Guimarães Santos e Ranyére Silva Nóbrega, por aceitar participar da banca examinadora deste estudo (na qualificação e defesa final), dedicando seu tempo para ler e analisar este trabalho. Grata por suas contribuições!

- Ao meu irmão e melhor amigo Joanilson Serra, sou grata por todo o suporte ao longo destes dois anos do mestrado, e por ser sempre tão atencioso e amoroso. Agradeço a valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho e por comemorar comigo cada sucesso.

- À minha irmã Glaucia Suelma, agradeço pela energia positiva e por todos os conselhos, grata por todo o carinho.

- À minha cunhada e irmã Russelle Cadilhe, seu apoio é sempre indispensável. Agradeço pela ternura que sempre me trata e pelas demonstrações de cuidado ao longo deste período.

- Agradeço aos meus familiares: tios, sobrinhos e primas. Aos meus tios e tias, mesmo eu estando quilômetros de distância, se mantiveram incansáveis em suas manifestações de apoio e carinho. Agradeço em especial ao tio Desiderio Serra, Sebastiana Serra, Lusiene Serra, Lindacir Serra, Miscilene Serra, Edison Serra, Sandra Helena, Antonio Ramos, Jansen Silva, Cosme Ribeiro e Luzia, vocês são sempre fundamentais em cada conquista minha. Aos meus sobrinhos e sobrinhas, grata pelos abraços apertados sempre que nos encontramos, e por me proporcionar tanta felicidade sempre que retorno para nosso lar. Vocês me ensinam a viver a plenitude do amor. Aos meus primos e primas, minha gratidão pelo incentivo permanente e apoio ao longo do período do mestrado, vocês são queridos.

- Ao Elvis Bergue Moreira e Célia Cristina Clemente Machado, pelo auxílio na elaboração dos modelos da estimativa dos parâmetros biofísicos.
- Ao professor João Aguinaldo, do Departamento de Estatística/UFPB, pela ajuda na análise estatística.
- Aos professores Marcelino Farias Filho e Juarez Diniz, do Departamento de Geociências/UFMA, por suas valiosas amizades e pelos ensinamentos. Minha gratidão pela confiança sempre depositada.
- Ao Alexandro Medeiros, pelas conversas constantes sobre os procedimentos metodológicos deste estudo, agradeço o convívio e sou grata principalmente pela amizade.
- Aos amigos do Laboratório de Ensino, Projetos e Pesquisas em Análises Espaciais (LEPPAN/UFPB), em especial a Nádja Oliveira, Glauciene Justino, Isabella Medeiros, Ana Xavier, Jullyane Barbosa, Irla Henriques, Jorge Casé e o queridíssimo José Carlos Dantas, agradeço a todos pela convivência, práticas na pesquisa e acolhimento no laboratório.
- Aos amigos Grupo de Estudos e Pesquisa em Edafologia e Pedologia (GEPEPE/UFMA), por esclarecer algumas dúvidas sempre que deles precisei.
- À Maisa Fausto, amiga mais que especial que conquistei na Paraíba, sou grata por compartilhar comigo as ansiedades e alegrias dos momentos do mestrado. Foi maravilhoso poder contar com você.
- Ao Sonadson Nery, agradeço a amizade, companhia nos momentos felizes e de inquietações e por me fazer sorrir tantas vezes com seu jeito único de ser.
- Aos amigos da Geografia da Paraíba, Rayssa Lisboa, Jefferson Chaves, Diego Monteiro, Franklin Mendonça, agradeço imensamente o convívio, vocês tornaram meus dias em João Pessoa-PB mais divertidos.
- Aos meus amigos Audivan Ribeiro e Paulo Pereira, pelas inúmeras vezes que solicitei alguma ajuda durante o período do mestrado e prontamente atenderam, agradeço também aos amigos queridos, Dinazilda, Jacilene, Vanessa, André, Juan, Mauricio, Jacenilde e Teresa, pelas palavras de apoio e pelo companheirismo.
- Ao Frederico Cardoso e Alison Gutembergue, pelo acolhimento nas primeiras semanas em João Pessoa-PB, grata pela parceria de vocês. Agradeço também as minhas companheiras de apartamento, Erica e Joyce, pelo convívio e amizade.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), da Universidade Federal da Paraíba, pela oportunidade em desenvolver esta pesquisa.
- As secretárias do PPGECAM, Miriam e Sara, pela ajuda sempre que precisei resolver algumas questões burocráticas do mestrado.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

“Viver é lutar. A vida é combate, que os fracos abate,
e os fortes, os bravos, só pode exaltar.” (Gonçalves Dias)

RESUMO

O processo de urbanização recente das cidades tem intensificado as modificações do uso e ocupação da terra, ocasionando diversos impactos ambientais oriundos da transformação do meio natural sem planejamento. Dentre os impactos ambientais, destaca-se a redução das áreas com cobertura vegetal, ocorrência de enchentes, poluição do ar e aumento das temperaturas. As zonas urbanas das cidades tendem a apresentar temperaturas mais elevadas do que as áreas ao seu entorno e na própria área urbana, este fenômeno é denominado de ilhas de calor. Várias técnicas têm sido utilizadas para analisar a influência do uso e ocupação da terra no fenômeno de ilhas de calor, entre elas destaca-se o uso das geotecnologias referentes ao Sensoriamento Remoto e aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Nessa perspectiva, este estudo tem como objetivo analisar a influência do uso e ocupação da terra no surgimento de ilhas de calor na cidade de Paço do Lumiar - MA. A delimitação da área de estudo analisada nesta pesquisa se justifica pelo fato de apresentar: (1) crescimento acelerado da população urbana, (2) expansão da malha urbana e (3) intensa alteração do uso e ocupação da terra. Para desenvolver desta pesquisa, foram adotados o uso de técnicas de sensoriamento remoto, processamento digital de imagens de satélite em ambiente SIG. Essas técnicas foram utilizadas para a classificação do uso e ocupação da terra e estimativa dos parâmetros biofísicos: índices de vegetação (IVDN, IVAS e IAF), albedo, temperatura da superfície (°C) e saldo de radiação (W/m²). Os resultados da classificação de uso e ocupação da terra mostraram que em 1988 a área urbana ocupava um total de 10,84 km² e em 2014 passou para 22,47 km². Os valores do albedo variaram entre 0,06–1,02. Os menores valores do albedo foram encontrados em áreas com presença de água e com cobertura vegetal de maior densidade e os maiores valores em áreas mais densamente urbanizada e sem cobertura vegetal. A análise da variação espaço-temporais do IVDN, IVAS e IAF ocorridas à superfície, demonstrou clara diminuição da classe dos valores mais elevados de vegetação, evidenciando a substituição da cobertura vegetal por áreas com maior urbanização. Os menores valores dos índices de vegetação são observados principalmente na porção sudoeste do município, área onde estão localizados os bairros mais densamente ocupados, a exemplo o bairro do Maiobão. Pôde-se verificar que as temperaturas de superfície apresentaram certo padrão de variação espacial, sobretudo, temporal. Nas datas analisadas a temperatura de superfície variou de 23 a 37°C, cujos menores valores são observados na classe de água e vegetação de maior densidade, evidenciando que áreas com maior disponibilidade de água e presença de vegetação podem contribuir para a amenização dos efeitos de anomalias térmicas como as ilhas de calor. A estimativa do saldo de radiação revelou que os maiores valores do saldo de radiação são encontrados sobre áreas com presença de vegetação densa e corpos hídricos e os menores valores nas classes urbano e vegetação arbustiva/herbácea, com valores variaram de 450 a 736 W/m². Os resultados da análise multitemporal do uso e ocupação da terra possibilitaram avaliar a influência da cobertura vegetal e sua fragmentação sobre o ambiente urbano da área de estudo e contribuíram para aquisição de dados para monitoramento da qualidade ambiental.

Palavras-chave: Urbanização, Sensoriamento Remoto, Índices de Vegetação, Temperatura de superfície, Ilhas de calor.

ABSTRACT

The recent process of city urbanization has intensified the changes in the land use and occupation, causing various environmental impacts from the transformation of the natural environment without planning. Among the environmental impacts there is the reduction of vegetation cover areas, occurrence of floods, air pollution and rising temperatures. Urban areas of cities tend to have higher temperatures than the areas to their surroundings and the very urban area, this phenomenon is called heat islands. Various techniques have been used to analyze the influence of the use and occupation of land in the heat island phenomenon, among them stands out the use of geotechnology for the Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS). In this perspective, this study aims to analyze the influence of land use and occupation in the emergence of heat islands in the city Paço do Lumiar – MA. The Delimitation of the study area analyzed in this study area analyzed in this research is justified by the fact present: (1) quick growth of urban population, (2) expansion of the urban network and (3) severe change of use and occupation of land. To develop this research, were adopted using techniques of remote sensing, digital processing of satellite imagery in a GIS environment. These techniques were used to classify the use and occupation of land and estimation of biophysical parameters: vegetation index (NDVI, IVAS and LAI), albedo, surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) and net radiation (W/m^2). The results of the land use and occupancy classification showed that in 1988 the urban area occupied a total of 10.84 square kilometers and in 2014 rose to 22.47 km^2 . The albedo values ranged from 0.06 to 1.02. The lowest values of albedo were found in areas with presence of water and vegetation cover higher density and higher values in more densely urbanized areas without vegetation. The analysis of NDVI of the spatio-temporal variation, IVAS and LAI occurred to the surface showed clear reduction of the class of higher values of vegetation, showing the replacement of vegetation by areas with greater urbanization, the lowest values of vegetation indices are observed mainly in the southwest portion of the city, area where are located the most densely occupied neighborhoods, like the Maiobão the neighborhood. It was verified that the surface temperatures showed certain pattern of spatial variation, above all, time. In dates analyzed surface temperature ranged from 23 to 37 $^{\circ}\text{C}$, the lowest values were observed in class and vegetation water of higher density, showing that areas with greater availability of water and the presence of vegetation. The estimated net radiation revealed that the highest values of net radiation are found on areas with presence of dense vegetation and water bodies and the lowest values in the urban classes and shrub/herbaceous, with values ranging from 450 to 736 W/m^2 . The results of multi-temporal analysis of the use and occupation of the land made it possible to evaluate the influence of vegetation cover and fragmentation on the urban environment of the study area and contributed to data acquisition for monitoring environmental quality.

Keywords: Urbanization, Remote Sensing, Vegetation indices, Surface temperature, Heat islands.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Paço do Lumiar no Estado do Maranhão e na Ilha do Maranhão.	22
Figura 2 - (a) Uso e ocupação da terra na Ilha do Maranhão em 1988, (b) Uso e ocupação da terra na Ilha do Maranhão em 2008.	23
Figura 3 - Crescimento da população urbana e rural do município de Paço do Lumiar (1980–2010).	24
Figura 4 - Densidade demográfica do município de Paço do Lumiar (2010).	25
Figura 5 - Climograma de precipitação média mensal (mm) e temperatura média (°C) entre os anos 1988 e 2014.	26
Figura 6 - Mapa hipsométrico do município de Paço do Lumiar.	27
Figura 7 - Escalas climáticas e camadas verticais existentes na área urbana.	31
Figura 8 - Variação da temperatura para diferentes tipos de uso do solo dia/noite.	33
Figura 9 - Esquema de captação por sensores remotos da energia eletromagnética.	37
Figura 10 - Espectro eletromagnético.	38
Figura 11 - Curvas características da refletância da água, solo e vegetação verde, apresentando faixas espectrais de absorção da radiação eletromagnética.	40
Figura 12 - Combinações de bandas espectrais em composições RGB para Landsat 5 ou Landsat 7 e Landsat 8.	44
Figura 13 - Albedos de várias superfícies urbanas.	52
Figura 14 - O efeito do albedo na temperatura da superfície.	53
Figura 15 - Influência da vegetação na temperatura da superfície.	54
Figura 16 - Fluxograma referente aos procedimentos metodológicos adotados neste estudo.	56
Figura 17 - Localização da estação meteorológica do INMET.	59
Figura 18 - Fluxograma das etapas computacionais do cálculo do saldo de radiação à superfície.	70
Figura 19 - Localização das áreas amostrais do uso e ocupação da terra.	71
Figura 20 - Localização do Bairro Maiobão no município de Paço do Lumiar.	73
Figura 21 - Precipitação no município de Paço do Lumiar referente aos 5 dias antes do imageamento do satélite para cada data.	74
Figura 22 - Alteração do uso e ocupação da terra entre os anos de 1988 a 2014.	76
Figura 23 - Mapa da classificação do uso e ocupação da terra do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	77
Figura 24 - Taxas do processo de degradação ambiental no município de Paço do Lumiar entre os anos de 1988 e 2014.	78
Figura 25 - Área com presença de degradação na cobertura vegetal.	79
Figura 26 - Mapa de albedo a superfície do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	81
Figura 27 - Mapa do IVDN do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	84
Figura 28 - (a) Área com presença de cobertura vegetal de maior densidade (vegetação arbórea/arbustiva); (b) Área com presença de vegetação herbácea.	85
Figura 29 - Mapa do IVAS do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	87
Figura 30 - Mapa do IAF do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	90

Figura 31 - (a) Novos conjuntos habitacionais na zona urbana da área de estudo; (b) Construção de novos empreendimentos e (c) Área com presença de solo exposto.....	91
Figura 32 - Mapa da temperatura de superfície do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	94
Figura 33 - Mapa do saldo de radiação do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	97
Figura 34 - Média aritmética das imagens de 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014: (a) média do albedo, (b) média do IVDN, (c) média do IVAS, (d) média do IAF, (e) média da temperatura da superfície (°C) e (f) média do saldo de radiação em W/m ²	99
Figura 35 - Localização de cada pixel em relação ao pixel de referência – “Pixel 5”.	100
Figura 36 - Mapa mostrando os traçados dos perfis da temperatura de superfície (eixos A-B; C-D; E-F)	103
Figura 37 - Gráfico do perfil de temperatura de superfície do eixo A-B nos dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014.	104
Figura 38 - Gráfico do perfil de temperatura de superfície do eixo C-D nos dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014.	105
Figura 39 - Gráfico do perfil de temperatura de superfície do eixo E-F nos dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014	106
Figura 40 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (02/08/1988).	107
Figura 41 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (14/06/1999).	107
Figura 42 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (04/02/2010).	108
Figura 43 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (27/09/2014).	108
Figura 44 - Histograma de frequência e curva de distribuição normal da temperatura de superfície da zona urbana: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	110
Figura 45 - Temperatura de superfície do bairro Maiobão: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014	111
Figura 46 - Modificação da cobertura do uso e ocupação da terra no bairro Maiobão (Praça do Viva Maiobão) - (a) 2010 e (b) 2014.....	111
Figura 47 - Composição RGB e imagem termal da Praça do Viva do Maiobão, localizada no bairro Maiobão. Figuras 47 (1–4) composição RGB das imagens de satélite, (1) 02/08/1988, (2) 14/06/1999, (3) 04/02/2010 e (4) 27/09/2014. Figuras 47(a–d) imagem termal, (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.	112
Figura 48 - Cobertura e uso da terra e variação de temperatura de superfície interurbana (imagem termal do dia 27/09/2014).	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema Clima Urbano. Articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção.	29
Tabela 2 - Possíveis causas para a ocorrência da ilha de calor.....	33
Tabela 3 - Características espectrais das imagens Landsat 5 e Landsat 7	42
Tabela 4 - Características espectrais da imagem Landsat 8.	43
Tabela 5 - Descrição dos Índices de Vegetação.	51
Tabela 6 - Parâmetros obtidos da passagem do satélite e na estação meteorologia (OMM: 82280- São Luís), para o cálculo dos parâmetros biofísicos e da temperatura estimada.	57
Tabela 7 - Descrição dos coeficientes de calibração das imagens Landsat 5 sensor TM... ..	58
Tabela 8 - Descrição dos coeficientes de calibração das imagens Landsat 8 sensor OLI. .	58
Tabela 9 - Quantificação das classes de uso e ocupação da terra no município de Paço do Lumiar em km ² e percentual.	75
Tabela 10 - Albedo estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.....	80
Tabela 11 - IVDN estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.....	82
Tabela 12 - IVAS estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.....	86
Tabela 13 - IAF estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.....	88
Tabela 14 - Temperatura estimada para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.....	92
Tabela 15 - Saldo de radiação estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.....	95
Tabela 16 - Temperatura estimada (T _s) do pixel de referência e dos pixels adjacentes à estação meteorológica do INMET entre 1988 e 2014	100
Tabela 17 - Coeficiente de variação e erro médio entre os dados de temperatura do ar obtidos na estação meteorológica do INMET e temperatura de superfície (considerando a média dos nove pixels).....	101
Tabela 18 - Coeficiente de variação e erro médio entre os dados de temperatura do ar obtidos na estação meteorológica do INMET e temperatura de superfície (considerando o valor do pixel de referência).	101

LISTA DE SIGLAS

CDU - Camada do Dossel Urbano

CLU - Camada Limite Urbana

CLP - Camada Limite Planetária

DSA - Dia Sequencial do Ano

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Agropecuária

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

ETM+ - *Enhanced Thematic Mapper Plus*

IAF - Índice de Área Foliar

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IVDN - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

MSS - *Multispectral Scanner*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

ND - Número Digital

OLI - *Operational Land Imager*

IVAS - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo

SCU - Sistema Clima Urbano

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission*

SPRING - Sistema de Informações Georreferenciadas

REM - Radiação Eletromagnética

RGB - Red, Green, Blue

UR - Umidade Relativa

USGS - *United States Geological Survey*

UTM - Universo Transverso de Mercator

UV- Radiação Ultravioleta

TIRS - *Thermal Infrared Sensor*

TST - Temperatura da superfície terrestre

TM - *Thematic Mapper*

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

A_L - Fator aditivo de conversão da radiância para cada banda espectral (Landsat 8)

A_p - Fator aditivo de conversão da reflectância para cada banda espectral (Landsat 8)

α_{toa} - Albedo do topo da atmosfera (Albedo planetário)

α_{sup} - Albedo de superfície

E (°) - Ângulo de elevação solar

$ESUN\lambda$ - Irradiância solar de cada banda no topo da atmosfera

L_λ - Radiância espectral de cada banda

σ - Constante de Stefan-Boltzmann

$\cos Z$ - Cosseno do ângulo de incidência da radiação solar

$\omega_{\lambda i}$ - Coeficiente de calibração para cada banda

ϵ_{NB} - Emissividade da banda larga

ϵ_0 - Emissividade termal

ϵ_a - Emissividade atmosférica

dr - Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol

kPa - Kilopascal

M_L - Fator multiplicativo de conversão da radiância para cada banda espectral (Landsat 8)

M_p - Fator multiplicativo de conversão da reflectância para cada banda espectral (Landsat 8)

μm - Micrômetro

$R_{S\downarrow}$ - Radiação de ondas curtas incidente

$R_{L\downarrow}$ - Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície

$R_{L\uparrow}$ - Radiação de onda longa refletida pela superfície

P_a - Pressão atmosférica

ρ_{λ} - Reflectancia espectral

ρ_{sup} = Refletância máxima espectral planetária,

ρ_{IV} - Refletividade do infravermelho próximo

ρ_{V} - Refletividade do vermelho

R_n - Saldo de radiação

T_a - Temperatura do ar

τ_{sw} - Transmissividade atmosférica

T_s - Temperatura estimada

T_o - Temperatura observada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos.....	21
1.1.1 Geral	21
1.1.2 Específicos	21
2. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	22
2.1 Localização da área de estudo	22
2.2 A expansão urbana de Paço do Lumiar (MA)	22
2.3 Características climáticas e físicas do município de Paço do Lumiar (MA).....	25
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
3.1 O clima urbano	28
3.1.1 Escalas espaciais de mensuração do clima urbano	30
3.1.2 O fenômeno de ilhas de calor.....	31
3.1.3 Tipos de ilhas de calor	34
3.2 Geotecnologias aplicadas à análise do uso da terra e suas influências nas ilhas de calor	35
3.2.1 Características das imagens de média resolução	40
3.2.2 Sensoriamento remoto no estudo de ilhas de calor.....	44
3.3 Parâmetros biofísicos na análise da cobertura da terra	47
3.3.1 Degradação ambiental e uso de índices de vegetação (IVDN, IVAS e IAF)	48
3.3.2 Albedo da superfície	51
3.3.3 Temperatura de superfície e saldo de radiação	53
4. MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1 Materiais.....	56
4.1.1 Obtenção das imagens orbitais.....	56
4.1.2 Dados meteorológicos das estações de superfície.....	59
4.2 Métodos	59
4.2.1 Pré-Processamento das imagens de satélite.....	59
4.2.2 Índice de degradação ambiental.....	61
4.2.3 Calibração radiométrica	61
4.2.4 Refletância espectral.....	62
4.2.5 Albedo no topo da atmosfera.....	64
4.2.6 Albedo da superfície	64
4.2.7 Índices de vegetação	65
4.2.7.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN.....	65
4.2.7.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – IVAS	66
4.2.7.3 Índice de Área Foliar – IAF.....	67
4.2.8 Emissividade da banda larga e emissividade do termal.....	67
4.2.9 Temperatura da superfície	68
4.2.10 Radiação de onda longa emitida	68
4.2.11 Radiação de onda longa incidente.....	68
4.2.12 Radiação de onda curta incidente	69
4.2.13 Saldo de radiação.....	69
4.2.14 Análise Estatística.....	70
4.2.15 Validação da temperatura de superfície.....	71
4.2.16 Elaboração dos perfis da temperatura de superfície e análise da correlação temperatura/topografia.....	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74

5.1 Condições Climáticas no momento de passagem do satélite	74
5.2 Evolução do uso e ocupação da terra no município de Paço do Lumiar.....	75
5.2.1 Degradação ambiental da área de estudo entre os anos de 1988 e 2014.....	78
5.3 Análise dos parâmetros biofísicos do município de Paço do Lumiar	79
5.3.1 Albedo da superfície	79
5.3.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN.....	82
5.3.3 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – IVAS	85
5.3.4 Índice de Área Foliar – IAF.....	88
5.3.5 Temperatura da Superfície.....	91
5.3.6 Saldo de radiação.....	94
5.3.7 Análise da média aritmética de cada parâmetro biofísico (álgebra de mapas).....	98
5.4 Validação da estimativa de temperatura à superfície	100
5.5 Perfil do campo térmico da superfície urbana e topografia da zona urbana de Paço do Lumiar.....	102
5.5.1 Perfil do campo térmico de superfície urbana.....	102
5.5.2 Topografia e variação de temperatura da superfície	106
5.6 Padrões de cobertura e uso da terra e temperaturas de superfície (2014).....	113
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

1. INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras, em sua maioria, têm crescido sem planejamento adequado, esta é uma característica principal das cidades onde o processo de urbanização ocorreu de forma acelerada (JORDÃO FILHO e OLIVEIRA, 2013). Nesse sentido, a modificação do uso e ocupação da terra e, conseqüentemente, a alteração da dinâmica ambiental, vêm desencadeando uma série de impactos ambientais, sociais e econômicos nas cidades. Dentre os problemas ambientais das cidades, cita-se, a exemplo: concentração de poluentes do ar e da água, degradação do solo e subsolo, modificação da paisagem natural e alteração da temperatura no ambiente urbano (LOMBARDO, 2009).

Lombardo (2009) destaca ainda que as alterações do clima urbano são um importante reflexo dos impactos do uso e ocupação da terra e das atividades antrópicas sobre o ambiente. A autora aponta ainda que o “clima urbano, além de apresentar alterações dos elementos climáticos, pode ser considerado um indicador das alterações da qualidade ambiental e de vida”.

Dentre os diversos fatores que alteram o clima de um determinado local, pode-se citar as modificações da cobertura da terra, redução das áreas verdes, impermeabilização do solo, a produção de calor gerado por atividades humanas no ambiente urbano das cidades (FEITOSA et al., 2011). Convém ressaltar que, os efeitos dessas transformações do ambiente natural tendem a afetar diretamente a população, causando a sensação de desconforto ambiental, e conforme Santos (1981), as condições ambientais das cidades quando são agravadas, criam uma natureza hostil para a população local.

Amorim (2009) aponta que a alta densidade de construções, concentração de materiais de grande potencial energético de emissividade e refletância contribuem para a alteração das temperaturas. Santos (2013) indica que, a análise das alterações do balanço de energia à superfície local, albedo, distribuição de umidade, concentração de poluentes, radiação na temperatura da superfície, são indicadores de impactos provocados pela modificação do uso e ocupação do solo das cidades.

Como resultado do processo de urbanização, as áreas urbanas das cidades tendem a apresentar temperaturas mais elevadas que as áreas ao seu entorno, assim, é possível perceber que, dentro de uma cidade existem áreas com diferentes temperaturas, este fenômeno caracteriza o que se chama de Ilha de Calor Urbana (LOMBARDO, 1985). Ilhas de calor são formadas em áreas urbanas e suburbanas porque muitos materiais de

construção comuns absorvem e retêm mais calor do sol do que materiais naturais em áreas rurais menos urbanizadas (GARTLAND, 2010).

As causas das Ilhas de Calor são variadas e é o resultado da interação de diversos processos. Oke (1987) aponta que as principais causas da origem do fenômeno de ilhas de calor são modificações no balanço radioativo devido à morfologia urbana e aos materiais de construção e às cores predominantes; emissão de calor de origem antrópica; acumulação diurna de calor nos edifícios e materiais de construção e que é liberado no período noturno; redução da velocidade do vento, devido às rugosidades da estrutura urbana e redução da evapotranspiração que ocorre devido à escassez de vegetação e ao predomínio de superfícies urbanizadas.

Para analisar a influência das alterações do uso e ocupação das terras e a formação de ilhas de calor no ambiente urbano das cidades é fundamental o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas, pois estas técnicas possibilitam observar os padrões espaciais de radiação térmica para estimar a temperatura da superfície terrestre. Estudos que aplicam técnicas de sensoriamento remoto por satélite têm assumido um papel importante no monitoramento e na análise dos fenômenos climáticos, servindo de suporte para compreender as mudanças ambientais, possibilitando a tomada de decisão para o gerenciamento e o monitoramento de ecossistemas terrestres (MOREIRA, 2005). Esse autor aponta ainda que, as geotecnologias são ferramentas fundamentais para o mapeamento do uso da terra. Além disso, o uso de imagens de satélite é uma técnica promissora devido ao baixo custo, periodicidade de mapeamento e fornecimento de importantes informações sobre mudanças no uso da terra.

Weng e Lu (2008) ressaltam que a classificação de imagens de média e alta resolução espacial é muito importante para elaborar mapeamentos de uso e ocupação da terra e nos estudos de Ilhas de Calor Urbano, e assim fazer estimativas dos níveis de alterações ambientais e relacionar com as anomalias nas temperaturas.

Assim, este estudo se propõe a analisar e identificar as alterações de temperatura na cidade do Paço do Lumiar (MA), mediante o uso de imagens do satélite Landsat 5/TM e Landsat 8/OLI, e estabelecer a correlação entre dados obtidos do albedo, temperatura de superfície e os índices de vegetação (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN, Índice de Área Foliar – IAF e Índice de Vegetação Ajustado por Solo – IVAS), que são importantes parâmetros para analisar as modificações ambientais ocorridas na superfície terrestre.

Vale salientar que o município de Paço do Lumiar (MA) está inserido em uma área de intenso processo de adensamento populacional, principalmente, considerando a última década, período o qual foi observado grandes transformações na paisagem urbana local, ocasionada por diversos processos da dinâmica urbana. Sendo assim, a delimitação da área de estudo, analisada nesta pesquisa, se justifica pelo fato do município de Paço do Lumiar (MA) apresentar crescimento acelerado da população urbana, expansão da malha urbana e intensa alteração do uso e ocupação da terra. Desta forma, espera-se que a realização deste estudo possibilite compreender, de maneira mais detalhada, as relações entre o processo de urbanização do município de Paço do Lumiar e as alterações no clima na escala local, no período entre 1988 e 2014.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar a influência do uso e ocupação da terra no surgimento de ilhas de calor na cidade de Paço do Lumiar - MA.

1.1.2 Específicos

Analisar as transformações do uso e ocupação da terra no município de Paço do Lumiar entre os anos de 1988 a 2014;

Estudar a degradação ambiental no município de Paço do Lumiar entre os anos de 1988 a 2014;

Estimar o saldo de radiação e a distribuição da temperatura da superfície terrestre para o município de Paço do Lumiar;

Avaliar a influência das áreas verdes e sua fragmentação sobre o ambiente térmico do bairro Maiobão, em Paço do Lumiar.

2. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização da área de estudo

O município de Paço do Lumiar localiza-se entre as coordenadas geográficas 2°27'42" S e 44°3'37" O e 2°33'9,84" S e 44°11'24,68" O, e apresenta altitudes que variam entre 2 e 51 m. Esse município compreende uma área territorial de 122 km² (Figura 1), e está situado na microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís e na Mesorregião Norte Maranhense, distante aproximadamente 21,6 km de São Luís, capital do Maranhão (IBGE, 2010).

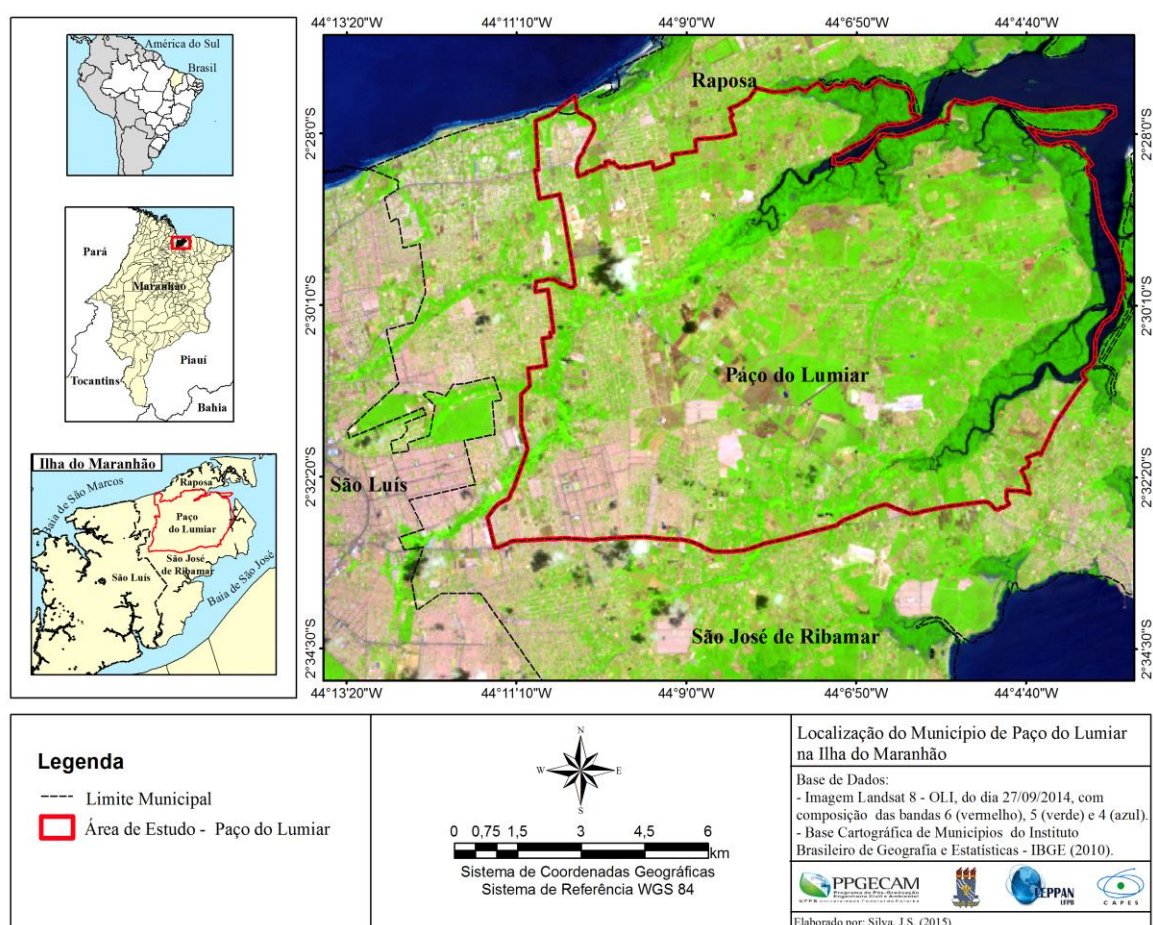


Figura 1 - Localização do município de Paço do Lumiar no Estado do Maranhão e na Ilha do Maranhão.
Fonte: Elaborado pela autora.

2.2 A expansão urbana de Paço do Lumiar (MA)

O acelerado crescimento do uso e ocupação da terra, pelo qual passa os municípios da Ilha do Maranhão, tem ocasionado ocupação desordenada, por sua vez, responsável pelo surgimento de diversos impactos ambientais e socioeconômicos. (SANTOS, 1996). Vale ressaltar que a Ilha do Maranhão é composta por quatro

municípios, são eles: São Luís (capital do Estado do Maranhão), São José de Ribamar, Raposa e Paço do Lumiar (área de estudo desta pesquisa).

De acordo com o Cordeiro; Diniz (2009), a expansão da malha urbana da Ilha do Maranhão, foi intensificada a partir da década de 1980, com a chegada de grandes projetos industriais, a exemplo da ALUMAR e Vale, antiga companhia Vale do Rio Doce. Esses grandes projetos, transformaram a Ilha do Maranhão em pólo de atração de mão de obra, fazendo crescer o espaço urbano. A Figura 2 (a-b) mostra a expansão da malha urbana na Ilha do Maranhão, entre os anos de 1988 e 2008.

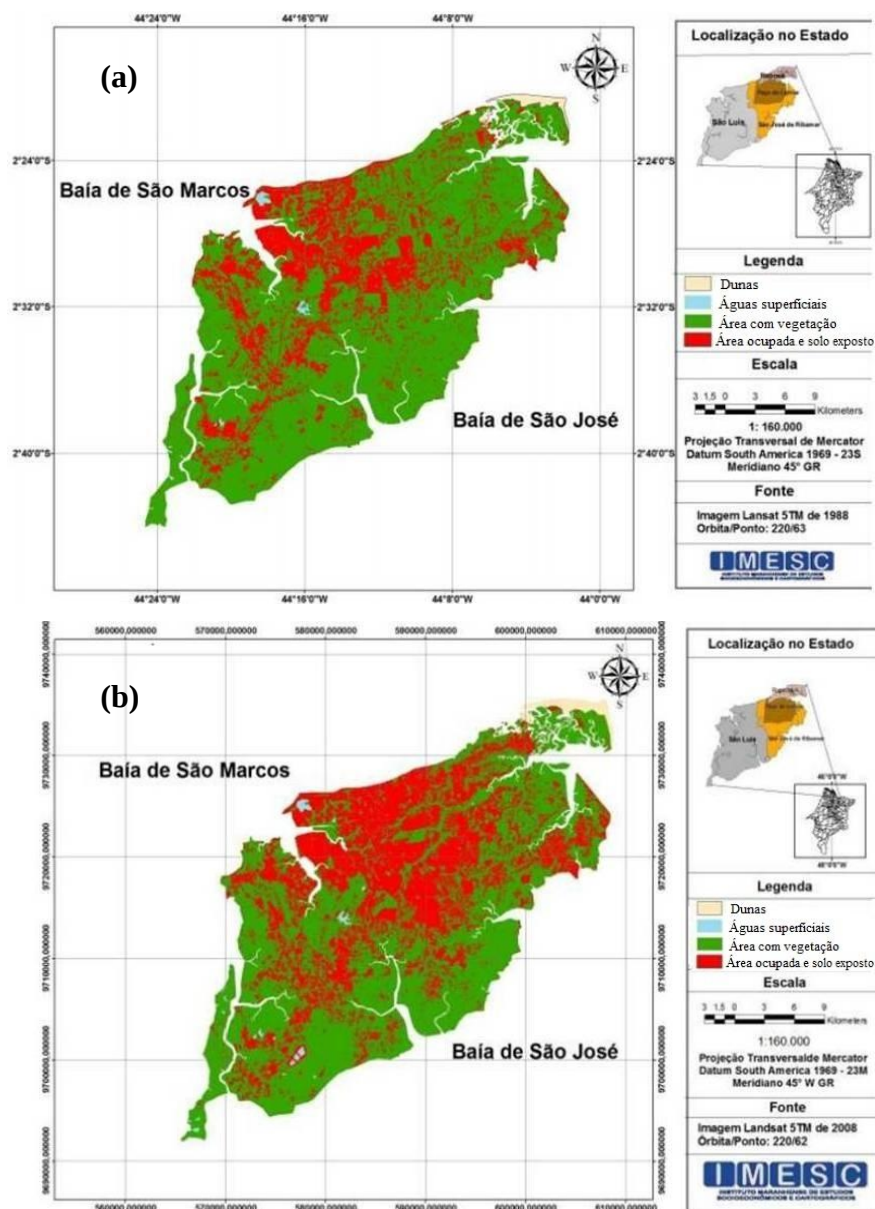


Figura 2 - (a) Uso e ocupação da terra na Ilha do Maranhão em 1988, (b) Uso e ocupação da terra na Ilha do Maranhão em 2008.

Fonte: adaptado de IMESC (2011).

O município de Paço do Lumiar apresentou acelerado ritmo de crescimento da população, e consequentemente, alterações do processo de uso e ocupação da terra. Conforme aponta o estudo de Masullo (2012), entre os anos de 1992 e 2010, Paço do Lumiar foi um dos municípios com maior alteração do uso e ocupação da terra, na microrregião da aglomeração urbana de São Luís (Ilha do Maranhão).

O crescimento dos índices demográficos e intensificação do uso e ocupação da terra de Paço do Lumiar, nos últimos anos, ocorreu em consequência da falta de espaço para expansão urbana na capital, município de São Luís, logo, os municípios vizinhos à São Luis começaram a receber maior fluxo populacional.

De acordo com os dados demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o município tinha uma população de 17.216 habitantes em 1980 e em 2010 passou para 105.121 habitantes, ou seja, um crescimento de 88,1%. Isto representou um aumento da densidade demográfica de 139,811 hab./km² para 948,303 hab./km² (IBGE, 1980; 2010). A Figura 3 indica que o crescimento populacional foi contínuo, expressivo, e determinante no processo de urbanização do município, e que em 2010, a população do município passou de rural para urbana vertiginosamente.

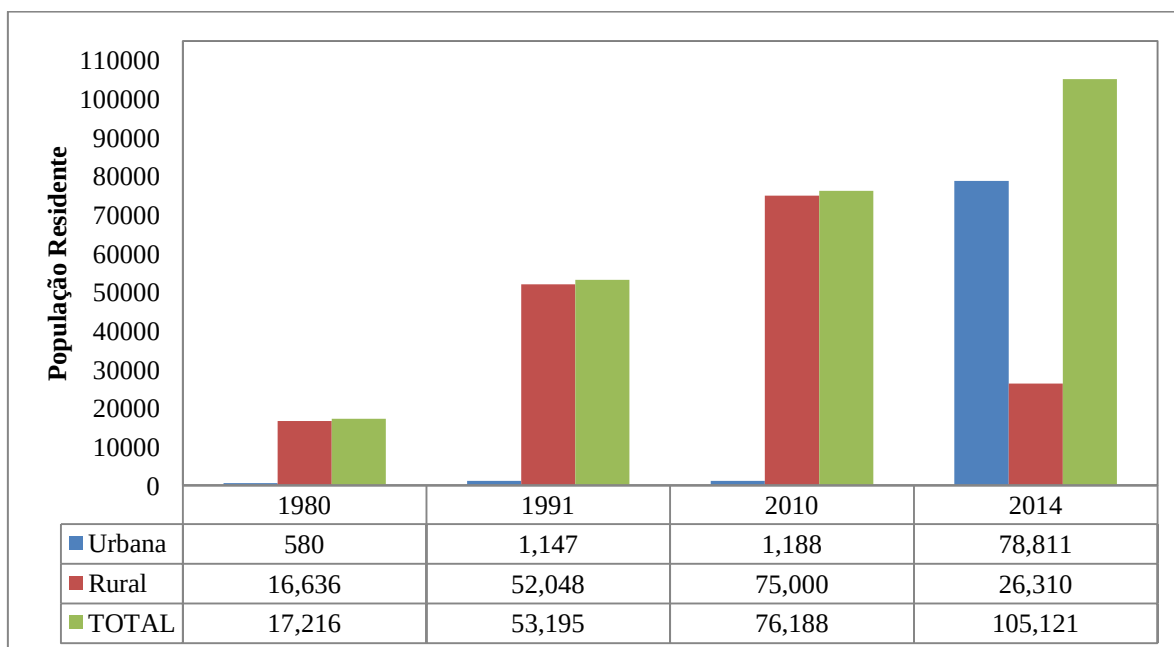


Figura 3 - Crescimento da população urbana e rural do município de Paço do Lumiar (1980–2010).

Fonte: IBGE (1980; 2010).

Com relação ao adensamento populacional de Paço do Lumiar, os dados do Censo Demográfico do IBGE de 2010 revelam que a população concentra-se majoritariamente na porção sudoeste (zona urbana do município) (Figura 4).

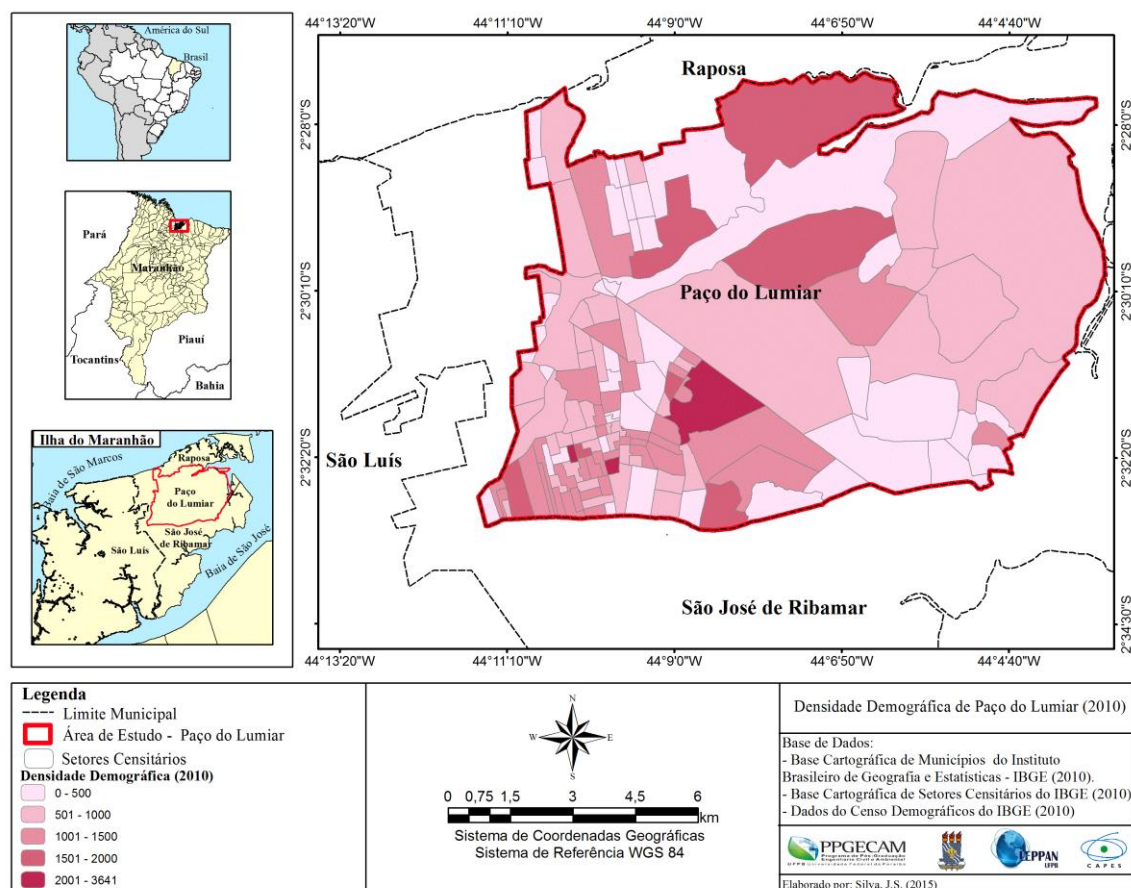


Figura 4 - Densidade demográfica do município de Paço do Lumiar (2010).

Fonte: Elaborado pela autora.

2.3 Características climáticas e físicas do município de Paço do Lumiar (MA)

As características climáticas da área possuem interferências da massa de ar Equatorial Continental e Equatorial Atlântica que correspondem à área de ocorrência dos ventos alísios de nordeste (FEITOSA, 1996). El-Robrini et al. (2006) salientam que esses “ventos são caracterizados como um presságio ao aumento das precipitações, e ficam bem definidos pelo perfil do vento próximo à superfície”. O período chuvoso é caracterizado por elevados valores de umidade relativa (em torno de 80%), baixa insolação (cerca de 150 h/mês), maior grau de nebulosidade (aproximadamente 7 décimos), fatores esses, que contribuiu para a redução das taxas de evaporação (EL-ROBRINI et al., 2006).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da área de estudo se enquadra na categoria climática Aw, tropical úmido, sendo caracterizado por dois períodos distintos quanto aos índices pluviométricos: um período chuvoso, com grandes índices pluviométricos, entre os meses de janeiro a junho, efeito do posicionamento da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) próximo ao litoral, e outro período de estiagem, com moderados índices de déficit hídrico, entre os meses de junho a dezembro.

A Figura 5 apresenta os dados da precipitação (mm) e a temperatura média mensal (°C) do município de Paço do Lumiar, no período de 1988 a 2014. Nota-se que entre os meses de julho a dezembro ocorrem os maiores valores da temperatura, com amplitude térmica entre os meses de outubro e novembro, que coincide com o período mais seco na área analisada. Característica inversa é observada entre os meses de janeiro e junho, que apresenta as menores temperaturas e maiores índices de precipitação.

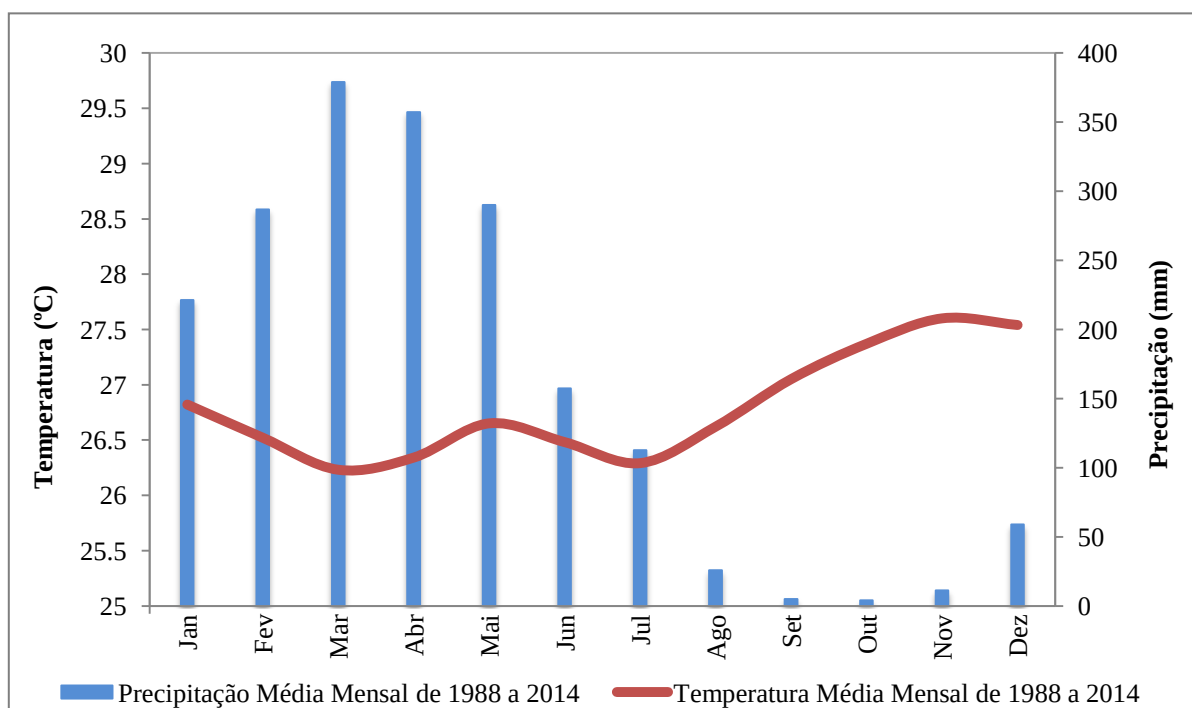


Figura 5 - Climograma de precipitação média mensal (mm) e temperatura média (°C) entre os anos 1988 e 2014.

Dados: INMET (2015).

A Figura 6 mostra a variação de altitude do município de Paço do Lumiar. A distribuição das classes hipsométricas revela que as áreas mais elevadas estão situadas entre 49 a 55 m de altitude, e as áreas mais baixas estão na faixa com altitude entre 0–6 m.

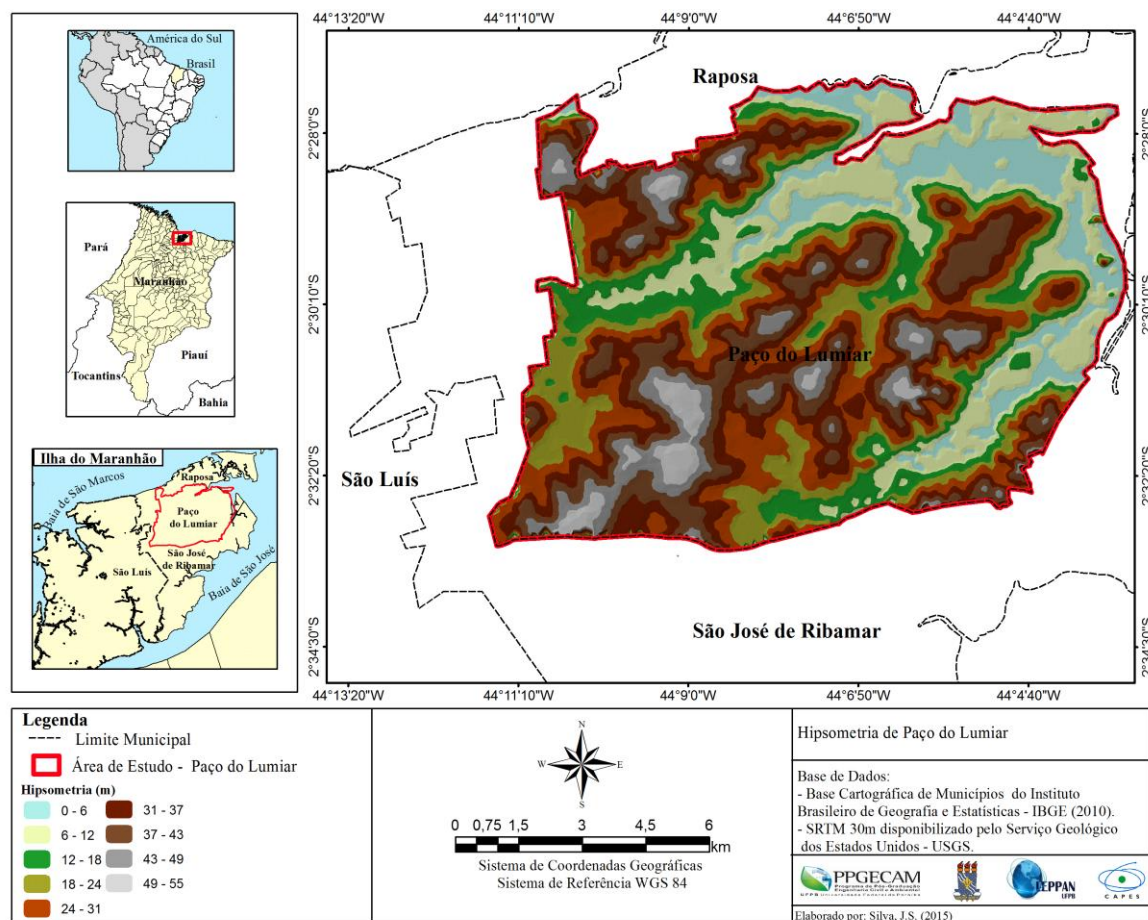


Figura 6 - Mapa hipsométrico do município de Paço do Lumiar.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A cobertura vegetal da área de estudo é caracterizada pela presença de manguezal, relativamente homogêneo e se estende por faixa de terras inundáveis pelas marés. De acordo com Rangel (2003), “este ecossistema é formado por estratificações vegetais que medem até 1 m de altura, em diferentes fases de maturação”. Também nota-se a presença de algumas espécies de considerável valor econômico, como: *Euterpe oleracea* (juçara/açaí), *Copaífera langsdorffii* (copaíba), *Hymenaea courbaril* (jatobá) e *Mauritia flexuosa* (buriti).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O clima urbano

“O clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização” (MONTEIRO, 2003). De acordo com as contribuições de Oke (1973, 1999), o clima da cidade é produto da transformação de energia, e tais transformações são originadas a partir das relações entre o ar atmosférico e o ambiente urbano construído.

Os estudos que trabalham com a abordagem de clima urbano têm evidenciado que, tanto em área tropical quanto temperada, as alterações do clima local estão associadas aos efeitos de transformação da energia na área urbana em função de sua morfologia, e principalmente em função das propriedades térmicas dos materiais empregados nas construções, pois estes contribuem para a produção de calor antropogênico (ASSIS, 2005).

Romero (2006) aponta que as intervenções no ambiente urbano causam alterações no clima de uma região e contribuem para a origem do clima local específico, o chamado clima urbano. Os materiais que constituem a superfície do ambiente urbano, a exemplo o asfalto, possuem capacidade térmica mais alta e são melhores condutores do que os materiais encontrados nas superfícies naturais, e contribuem para alterar o clima na escala local. O autor acrescenta ainda que:

“é fundamental o conhecimento dos fatores ambientais em todas as escalas, reconhecendo que o meio natural é afetado pelo processo de urbanização e que os elementos ambientais também afetam a morfologia da urbanização, alterações que podem ser identificadas no aparecimento de microclimas urbanos” (ROMERO, 2006, p.12).

Analisando as alterações climáticas por quais passam os centros urbanos, Monteiro (1976) desenvolveu uma teoria para o estudo do clima urbano denominada de SCU (Sistema Clima Urbano). Em conformidade com a análise do autor, o SCU tem como principal foco de estudo o clima da cidade a partir de uma análise integrada. A teoria do SCU de Monteiro (1976) pode ser dividida em três subsistemas: o termodinâmico, o físico-químico e o hidrometeorológico, e estes são diretamente relacionados com os canais de percepção humana: conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteorológico (Tabela 1).

O subsistema termodinâmico enfatiza as análises de ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas, conforto e desconforto térmico e os estudos de inversão térmica. O

segundo subsistema, o físico-químico, está relacionado à análise da dinâmica do ar e suas interações com a cidade, com destaque para a poluição do ar, chuvas ácidas, a relação entre as estruturas urbanas e os ventos, ou seja, a relação entre morfologia urbana e fenômenos climáticos, e, por fim, o subsistema hidrometeorológico, este está relacionado aos estudos das precipitações urbanas e seus impactos, a exemplo os processos de inundação nas cidades como consequência da impermeabilização do solo (COLTRI, 2006). Vale salientar que neste trabalho o enfoque será no subsistema termodinâmico.

Tabela 1 - Sistema Clima Urbano. Articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção.

Caracterização	SUBSISTEMAS		
	Termodinâmico	Físico-Químico	Hidrometeorológico
	CANAIS DE PERCEPÇÃO		
	I Conforto térmico	II Qualidade do Ar	III Impacto Meteorológico
Fonte	Atmosfera, Radiação Circulação horizontal	Atividade urbana. Veículos auto-motores. Indústrias Obras-limpeza	Atmosfera Estados especiais (desvios rítmicos)
Trânsito no sistema	Intercambio de operador e operando	De operando ao operador	Do operador ao operando
Mecanismo de ação	Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação núcleo ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódico (eventual)
Observação	Meteorológica especial (trabalho de campo)	Sanitária e meteorológica especial	Meteorológica Hidrológica (trabalho de campo)
Correlações disciplinares e tecnológicas	Bioclimatologia Arquitetura Urbanismo	Engenharia sanitária	Engenharia sanitária e infra estrutura urbana
Produtos	“Ilhas de calor”, Ventilação Aumento de precipitação	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos diretos	Desconforto e redução no desempenho humano	Problemas sanitários. Doenças respiratórias, oftalmológicas etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	Controle de uso do solo Tecnologia de conforto habitacional	Vigilância e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infraestrutura urbana e da regularização fluvial. Uso do solo.
Responsabilidade	Natureza e Homem	Homem	Natureza

Fonte: Monteiro (2003).

3.1.1 Escalas espaciais de mensuração do clima urbano

Uma importante característica que deve ser analisada no estudo do clima refere-se à análise das escalas climáticas. A classificação mais utilizada nos estudos de clima urbano foi proposta por Oke (1984). Conforme esse autor existe três escalas horizontais de análise do clima urbano, são elas: (a) Microescala (*Microscale*), (b) Escala local (*Local Scale*) e (c) Mesoescala (*Mesoscale*).

- Microescala: escalas típicas de microclimas urbanos são definidos pelas dimensões de elementos individuais, corresponde à influência de objetos de pequenas dimensões: construções, árvores, estradas, ruas, pátios, jardins, etc., abrange o clima de áreas de curtas distâncias, estende-se de um a centenas de metros,
- Escala Local: esta escala inclui efeitos climáticos das características da paisagem, tais como topografia. Nesta escala excluem-se os efeitos de microescala e é característica desta escala o clima de áreas que variam de um a vários quilômetros, cita-se a exemplo de um espaço que caracteriza esta escala o clima de um bairro.
- Mesoescala: esta abrange dezenas de quilômetros de extensão e corresponde ao clima de uma cidade inteira, e de acordo com Oke (2004), uma única estação meteorológica não é capaz de representar o clima nesta escala.

De acordo com Oke (1976) existem duas camadas principais da atmosfera para estudo das ilhas de calor, a Camada do Dossel Urbano – CDU (*Urban Canopy Layer*) e a Camada Limite Urbana – CLU (*Urban Boundary Layer*), conforme o autor existe ainda uma terceira camada de análise do clima, é a chamada Camada Limite Planetária – CLP (*Planetary Boundary Layer*) cujas características são afetadas pela presença da Camada Limite Urbana. De acordo com Grimmond (2006), o estudo das camadas atmosféricas é fundamental para a compreensão do padrão espacial e temporal da ilha de calor.

A Camada do Dossel Urbano- CDU é definida como a coluna de ar que se estende desde o solo até a altura dos edifícios, nesta camada se produzem as interações na microescala e as trocas de calor entre as paredes dos prédios, ruas e as emissões antropogênicas. Considera-se que esta é uma camada estratificada da CLU, com fluxo médio e turbulento dos ventos (GARTLAND, 2010; OKE, 1997; OKE, 1976).

A segunda camada está situada acima da CDU, denomina-se Camada Limite Urbana – CLU com dimensão espacial de mesoescala, sua altura depende das características da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica e o fluxo de ar é

fortemente modificado pela geometria dos edifícios. A CLU é entendida como a parte inferior da Camada Limite Planetária (CLP) (OKE, 1997; GRIMMOND, 2006).

A CLP é a região da atmosfera que está diretamente influenciada pelas trocas de calor e vapor d'água que ocorrem entre superfície terrestre e a atmosfera, localiza-se a 1 ou 2 km acima da superfície terrestre, esta é a porção mais baixa da troposfera e é afetada pela superfície numa escala de tempo inferior a uma hora, sendo que a estrutura da CLP pode variar em função da superfície abaixo dela (OKE, 1976).

A Figura 7 representa as três escalas horizontais utilizadas para distinguir os processos atmosféricos que ocorrem na área urbana: (a) mesoescala, (b) escala local e (c) microescala, representa também as camadas atmosféricas que são tipicamente identificadas em cada escala: Camada Limite Planetária – CLP, Camada Limite Urbana – CLU e Camada do Dossel Urbano (CDU) (GRIMMOND, 2006).

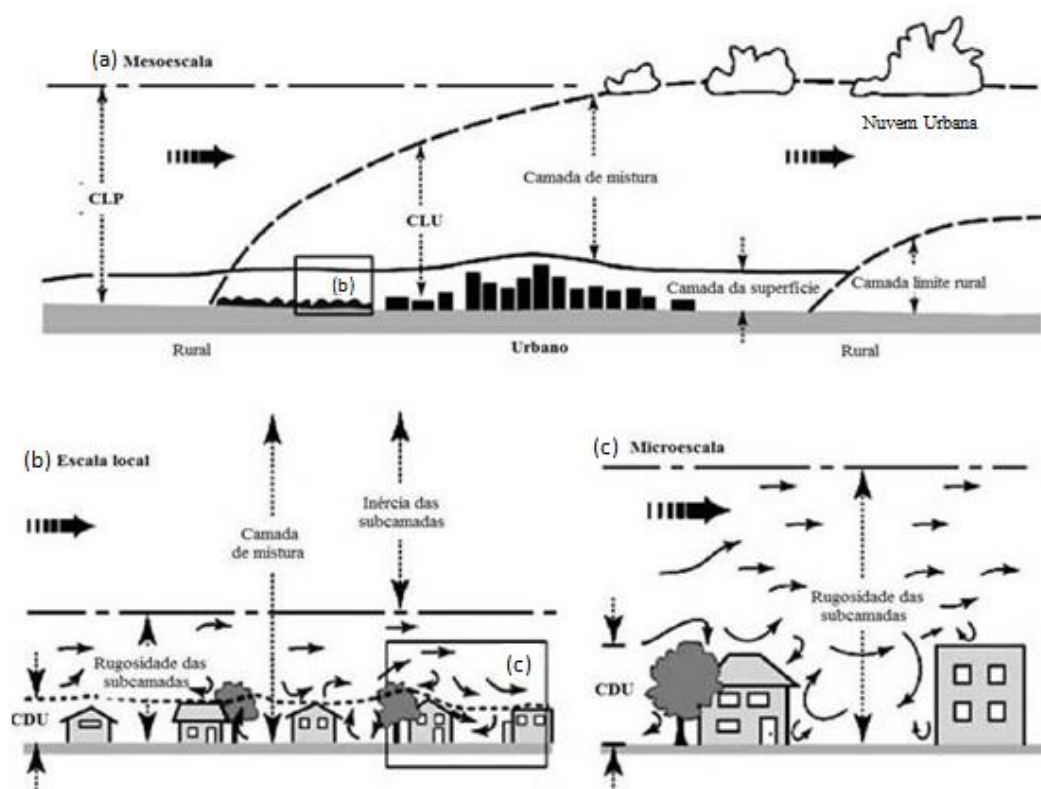


Figura 7 - Escalas climáticas e camadas verticais existentes na área urbana.

Fonte: Adaptado de Grimmond (2006).

3.1.2 O fenômeno de ilhas de calor

Entre as diversas causas que contribuem para a formação do fenômeno de ilha de calor, a urbanização é considerada o mais relevante, pois contém em sua estrutura elementos que fazem com que em determinadas áreas a temperatura seja mais elevada que

áreas circunvizinhas. Oke (1973) aponta que a ilha de calor é o exemplo mais evidente da interferência do homem no ambiente natural.

Gartland (2010) esclarece que “áreas com menos vegetação e mais desenvolvidas tendem a ser mais quentes, e ilhas de calor tendem a ser mais intensas conforme o crescimento das cidades”. Conforme a autora, o fenômeno de Ilhas de Calor está relacionado a áreas em que a temperatura do ar encontra-se mais elevada do que as áreas circundantes, e sua intensidade varia durante o dia e a noite.

Costa et al. (2010) afirmam que as propriedades radiativas e térmicas dos materiais urbanos, em particular a emissividade, capacidade, e condutividade térmica, são fatores que possibilitam o desenvolvimento do fenômeno ilha de calor, visto que elas determinam como as radiações de ondas curta e longa são refletidas, absorvidas e armazenadas. O autor acrescenta ainda que, “regiões urbanizadas geralmente refletem menos e absorvem mais radiação solar, acarretando aumento na temperatura da superfície”, e aponta medidas de intervenção urbanas que possibilitem a mitigação dessa problemática pelo poder público, que deveria estabelecer uma legislação que defina uma relação adequada entre espaço construído e área verde.

Outra medida seria elaboração de um plano de rearborização dos bairros onde foram detectadas as ilhas de calor. Lombardo (1985) e Costa et al. (2010) afirmam que a “ausência de parâmetros adequados de verticalização e ocupação, sobretudo onde ela cresce a uma velocidade rápida e com poucos recursos técnicos, pode colocar em risco a qualidade de vida dos seus habitantes”.

Conforme Oke (1981), uma das principais características relacionadas ao fenômeno das Ilhas de Calor no ambiente Urbano é a presença de maiores índices térmicos nas regiões centrais quando comparado a áreas periféricas. Essa característica está relacionada com a maior atividade antrópica nessa região. Lombardo (1985) esclarece que é na região central das áreas urbanas onde ocorre a menor presença de vegetação, e onde as temperaturas atingem valores mais elevados, e os valores mínimos são registrados em áreas verdes, que na maioria das vezes está mais afastado da zona densamente ocupada das cidades, assim como é observado na Figura 8, onde diferentes regiões da cidade apresentam variação de temperatura de acordo com a intensidade de urbanização.

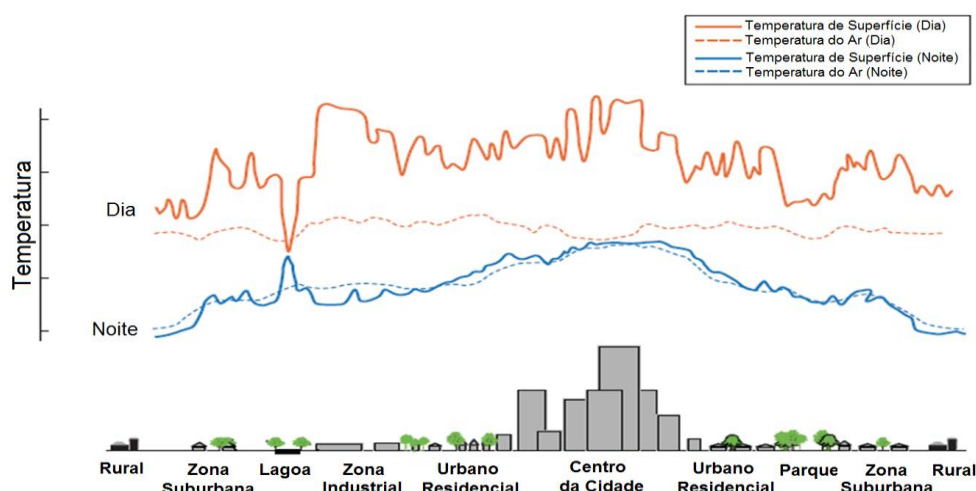


Figura 8 - Variação da temperatura para diferentes tipos de uso do solo dia/noite.

Fonte: adaptado de EPA (2008a).

Assim, como já descrito anteriormente, várias são as causas da ocorrência do fenômeno de Ilhas de Calor. Lucena (2013) corrobora com os autores já mencionados no que se refere às causas da ocorrência do fenômeno, no qual ressalta ainda que a formação das ilhas de calor têm cinco possíveis causas principais, são elas: alteração superfície urbana, propriedades térmicas da superfície, condições da superfície, calor antropogênico e efeito estufa urbano. A Tabela 2 apresenta a descrição destas possíveis causas que contribuem para a ocorrência da ilha de calor no ambiente urbano das cidades.

Tabela 2 - Possíveis causas para a ocorrência da ilha de calor

Causa	Descrição
Superfície urbana	A ampliação da superfície conduz ao aquecimento devido a uma maior absorção de radiação solar; Construções pouco espaçadas reduzem o fator de visão do céu e reduzem a perda de calor radiativo particularmente à noite; O abrigo/telhado das construções reduz a perda de calor convectiva da superfície e próximo da superfície de ar.
Propriedades térmicas da superfície	Materiais de construções urbanas têm uma superfície termal maior, ampliando sua capacidade de estocar e suportar calor.
Condições da superfície	A impermeabilização da superfície urbana por construções e pavimentação reduz a evaporação; mais energia é canalizada em calor sensível ao invés de calor latente (calor retornado pela evaporação da água).
Calor antropogênico	Calor liberado por uso de energia urbana em construções e veículos e pelos próprios habitantes da cidade.
Efeito estufa urbano	A atmosfera poluída e mais quente emite mais radiação em direção à superfície da cidade. A umidade urbana reforçada pode também contribuir para esse efeito.

Fonte: Lucena (2013)

3.1.3 Tipos de ilhas de calor

Segundo Fialho (2009), existem diferenças entre ilhas de calor, o autor aponta existência de três tipos de ilha de calor, são elas: ilha de calor atmosférica, vertical e de superfície. Fialho (2009; 2012) esclarece que a opção de se assumir a existência de três tipos de ilhas de calor está relacionado com o fato de serem empregados na análise do fenômeno métodos de observação e estrutura espacial distintas, permitindo assim, analisar as ilhas de calor de diferentes formas. A seguir será descrito as características dos tipos de ilhas de calor conforme Fialho (2009).

- Ilha de calor atmosférica: a ilha de calor urbana atmosférica apresenta uma variabilidade temporal, é mais evidente no período noturno e é medida através da temperatura do ar em transectos móveis ou pontos fixos. Fialho (2009) aponta que embora diversos estudos desenvolvidos em cidades de latitudes médias observaram que existe predomínio da formação das ilhas de calor no período noturno, algumas pesquisas realizadas em cidades tropicais, a exemplo Juiz de Fora (Martins, 1996) e Rio de Janeiro (BRANDÃO, 1996, 2001), a intensidade máxima das ilha de calor atmosférica foram observadas no período diurno.

- Ilha de calor vertical: estas podem ser analisadas conforme a estratificação urbana e a morfologia da área analisada. Oke (1976) apresenta uma divisão para a análise deste tipo de ilha de calor, conforme o autor esta é compreendido em duas camadas: a Camada do Dossel Urbano - CDU (*Urban Canopy Layer*) e a Camada Limite Urbana-CLU (*Urban Boundary Layer*) já descritos em tópicos anteriores deste trabalho.

- Ilha de calor de superfície: estas estão em contato com a atmosfera urbana inferior (Lopes, 2009). Apresentam como principal ferramenta de análise, o uso de sensoriamento remoto por meio de imagens termais. Mendonça (1994), em seu trabalho de doutorado, aponta que “o campo térmico das cidades, enquanto subdivisão do clima urbano tem sido aquele no qual mais se tem empregado as imagens de satélites, notadamente no estudo das ilhas de calor urbano”. Salienta-se que neste estudo, o tipo de ilhas de calor que pretende-se analisar será a de superfície.

3.2 Geotecnologias aplicadas à análise do uso da terra e suas influências nas ilhas de calor

As geotecnologias podem ser entendidas como um conjunto de tecnologias que auxiliam nos estudos sobre o ambiente, avaliando as informações geográficas para melhor análise do ambiente e auxiliando no processo de gerenciamento de informações, contribuindo para a gestão municipal, estadual e federal e proteção ambiental. Salienta-se que nos últimos anos têm crescido, em diversas áreas da ciência, o número de estudos que utilizam as ferramentas de geotecnologias, a exemplo cita-se os estudos de Lombardo (2011); Xiong (2012); Li (2011) e Moreira (2011).

De acordo com Fitz (2008a), as geotecnologias podem ser conceituadas como novas tecnologias ligadas às geociências e correlatas, e que trazem avanços significativos no desenvolvimento de pesquisas, planejamento ambiental e manejo dos recursos naturais. Rosa (2009) corrobora com Fitz (2008a) e acrescenta que as geotecnologias estão fundamentadas na coleta, processamento, análise e na oferta de informações com referência geográfica. Conforme o autor as geotecnologias constituem-se em importante ferramentas para tomada de decisões. Lombardo (2011, p. 12) ressalta que:

O uso de geotecnologias nos estudos de vulnerabilidade ambiental a mudanças climáticas globais em áreas urbanas constitui um procedimento de aplicação dos recursos tecnológicos atuais (como é o caso do sensoriamento remoto), na análise da dimensão humana na vulnerabilidade ambiental às mudanças globais, através de métodos qualitativos e quantitativos.

O uso de produtos do sensoriamento remoto, a exemplo, as imagens de satélite, é de fundamental importância para análise do uso e ocupação da terra, pois permitem obter informações de maneira rápida, precisa e com custo financeiro relativamente baixo. Moraes (2002) aponta que as atividades relacionadas ao sensoriamento remoto envolvem “a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos”.

Os satélites mostram-se como uma importante ferramenta na análise do uso e ocupação da terra devido a sua alta capacidade de cobertura espacial. Florenzano (2011, p.91) esclarece que:

as imagens de satélites proporcionam uma visão sinóptica (de conjunto) e multi-temporal (de dinâmica) de extensas áreas da superfície terrestre. Elas mostram os ambientes e a sua transformação, e destacam os impactos causados pelos fenômenos naturais e pela ação do homem com o uso e a ocupação do espaço. Os elementos da paisagem mais visíveis em imagens de satélites e fotografias são o relevo, a vegetação, a água e o uso da terra.

Conforme Fitz (2008b), o sensoriamento remoto e o geoprocessamento se constituem em um conjunto de tecnologias que processa e assimila informações georreferenciadas, e um dos objetivos do seu uso é produzir informação espacial e análise do uso e ocupação da terra. Rocha (2000) define o geoprocessamento como o conjunto de técnicas e metodologias que possibilitam o arquivamento, processamento e representação de dados georreferenciados.

Neste sentido, faz-se necessário o uso de programas específicos, como por exemplo, os SIGs (Sistemas de Informações Geográficas). A tecnologia que envolve os SIGs integra operações convencionais, bases de dados, armazenamento e manipulação de dados e análises estatísticas, conjuntamente com a visualização e geração de produtos cartográficos. Fitz (2008b, p. 26) conceitua SIG como:

um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados especialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido.

O uso das técnicas de geoprocessamento permite analisar as modificações ocorridas na cobertura do solo no passado, presente e em cenários futuros permitindo realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados.

O uso do geoprocessamento e da ferramenta SIG está associada à existência de uma base de dados georreferenciadas, isto é, um dado georeferenciado é aquele que possuem coordenadas geográficas. Vale ressaltar que grande parte da base de dados empregados nos estudos de uso e ocupação da terra e análise do fenômeno de ilhas de calor do ambiente urbano é oriunda do sensoriamento remoto.

Dados obtidos por sensoriamento remoto são fundamentais nos estudos de uso e ocupação da terra e análise do fenômeno de ilhas de calor, possibilitando análises que subsidiam o processo de planejamento e gestão urbana. O conceito de sensoriamento remoto é interpretado de diversas maneiras. Novo (1988) define sensoriamento remoto como “utilização de sensores para a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles”.

Já Figueiredo (2005) evidencia que o sensoriamento remoto é entendido como uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre através da detecção e medição das respostas espectrais da radiação eletromagnética com os materiais da superfície terrestre.

Florenzano (2002) corrobora com os autores supracitados, e aponta que, o sensoriamento remoto permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo sensoriamento refere-se à obtenção de dados de remoto significa distante e é utilizado porque a obtenção dos dados é feita a distância sem que exista o contato físico entre o sensor e a superfície terrestre. A Figura 9 representa o esquema de captação da energia eletromagnética, onde a energia proveniente do sol é refletida pela superfície em direção ao sensor, os sensores captam a radiação emitida e transformam em sinais elétricos e em seguida transformados em imagens orbitais.

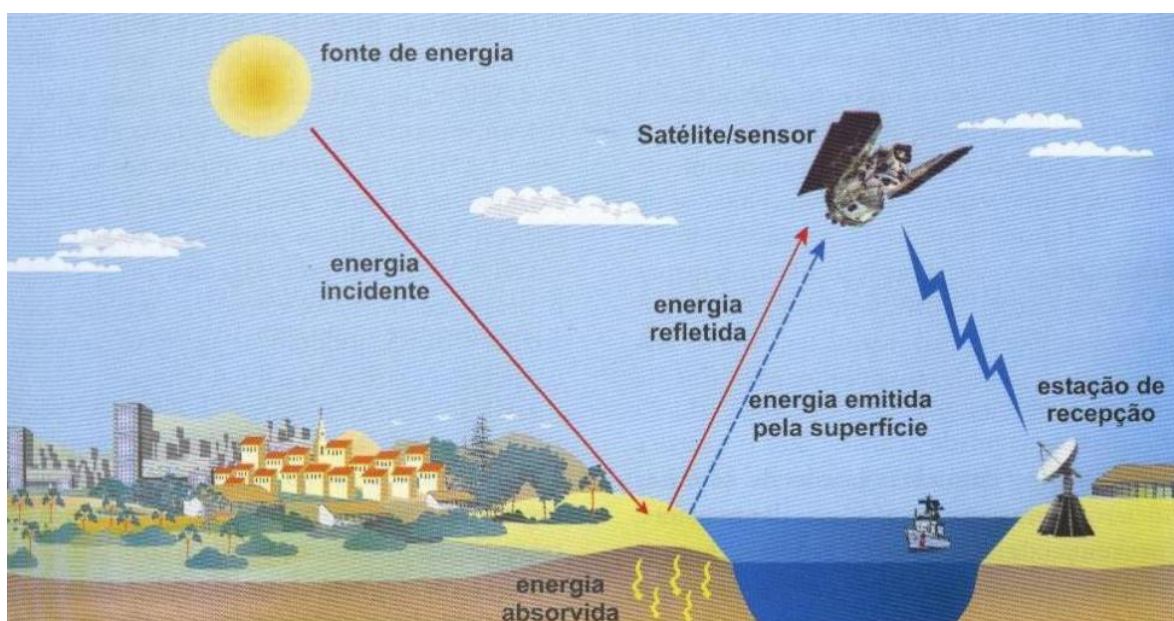


Figura 9 - Esquema de captação por sensores remotos da energia eletromagnética.
Fonte: Florenzano (2002).

A aquisição de dados através do sensoriamento remoto permitem avaliar as propriedades físico-químicas de alvos naturais e artificiais, por meio da detecção e análise de fluxo de energia radiante, também se apresenta como uma ferramenta valiosa na estimativa da temperatura da superfície, pois permite analisar as modificações ocorridas na superfície e que podem contribuir para alterar a temperatura (ROSA, 2009).

Os princípios físicos do sensoriamento remoto baseiam-se na radiação eletromagnética (REM), pois é por meio dela que a informação da superfície é transferida até os sensores que estão a bordo dos satélites. Novo (1998) aponta que a radiação eletromagnética é constituída de várias características físicas, como por exemplo: a energia, frequência, comprimento de onda e intensidade e que devido às variações das características físicas torna-se possível distinguir os objetos da superfície terrestre captados pelos satélites (sensores remotos).

De acordo com Meneses (2012) a explicação de que a REM começa com o entendimento do comportamento da sua natureza: onda e energia, ou seja, a REM que se propaga pelo espaço vazio, como a luz solar, é, ao mesmo tempo, uma forma de onda e uma forma de energia. A luz visível, ondas de TV/rádio, raios ultravioleta, microondas e raios X são ondas eletromagnéticas e podem ser definidas como vibrações dos campos magnéticos e elétricos, estas se propagam através do espaço. As ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo na velocidade da luz, 299.292,46 km/s ou aproximadamente 300.000 km/s, e o comprimento de onda está relacionado à frequência de onda que se repete por unidade de tempo.

A faixa de comprimentos de onda e de frequência da REM é denominada de espectro eletromagnético (Figura 10), o qual varia desde as radiações gama, de alta frequência, até as ondas de rádio e TV, de baixa frequência (Figueiredo, 2005).

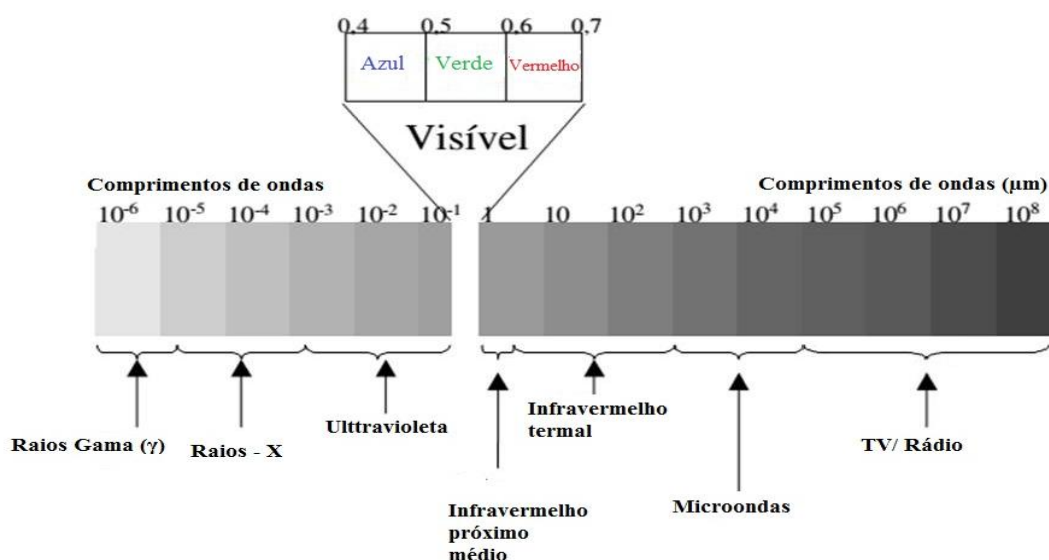


Figura 10 - Espectro eletromagnético.
Fonte: adaptado de Figueiredo (2005).

A radiação do espectro eletromagnético com comprimento de onda inferior a $0,001\ \mu\text{m}$ corresponde às ondas de raios-X, estas possuem altas frequências e são utilizadas principalmente na medicina, em exames de radiologia. Na faixa espectral de $0,01$ a $0,39\ \mu\text{m}$ estão compreendidas as ondas da radiação ultravioleta (UV). Na região do visível (luz) o comprimento de ondas varia de $0,45$ - $0,7\ \mu\text{m}$, esta é a região do espectro solar com alta intensidade de fluxo radiante, é denominada de visível porque o olho humano é sensível a esta região do espectro.

Nesta região é possível distinguir as cores do violeta ao vermelho. A cor que é produzida pela luz está associada a diferentes comprimentos de ondas, as cores estão associadas aos seguintes intervalos espectrais: violeta ($0,38$ a $0,45\ \mu\text{m}$), azul ($0,45$ a $0,49\ \mu\text{m}$), verde ($0,49$ a $0,58\ \mu\text{m}$), amarelo ($0,58$ a $0,6\ \mu\text{m}$), laranja ($0,6$ a $0,62\ \mu\text{m}$) e vermelho ($0,62$ a $0,70\ \mu\text{m}$) (MORAES, 2002). A radiação do infravermelho, a relacionada com o calor, é subdividida em três regiões: infravermelho próximo, médio e distante ou termal, com comprimento de onda de $0,7$ – $1,3\ \mu\text{m}$, $1,3$ - $6,0\ \mu\text{m}$ e $6,0$ – $1000\ \mu\text{m}$ respectivamente (FLORENZANO, 2002). Vale ressaltar que, as faixas espectrais mais utilizadas no sensoriamento remoto compreendem a faixa do visível, infravermelho próximo, médio e distante ou termal, com destaque na faixa do visível para os intervalos espectrais na cor azul, verde e vermelho.

De acordo Ponzoni e Shimabukuro (2007, p. 16), “a aparência da cobertura vegetal em um determinado produto de sensoriamento remoto é fruto de um complexo que envolve vários parâmetros e fatores ambientais”. Florenzano (2002) evidência que os objetos da superfície terrestre como, por exemplo, vegetação, água e o solo refletem, absorve e transmite radiação eletromagnética em proporções que variam de acordo com o comprimento de onda e conforme as suas características bio-físico-química.

A Figura 11 mostra o gráfico do comportamento espectral ou assinatura espectral da vegetação, da água e do solo. Representa a relação entre a energia refletida e o comprimento de onda de alguns objetos da superfície terrestre, Analisando a figura, verifica-se que é na faixa do infravermelho próximo que a vegetação reflete mais energia e se diferencia dos demais objetos.

A curva do solo mostra um comportamento mais uniforme, ou seja, menor variação de energia refletida, em relação à vegetação, ao longo do espectro. Nota-se que a água limpa reflete pouca energia na região do visível e praticamente nenhuma energia na região do infravermelho, enquanto que a água turbida, com presença de sedimentos em

suspensão ou poluída, reflete mais energia, porém, somente na região do visível (FLORENZANO, 2002).

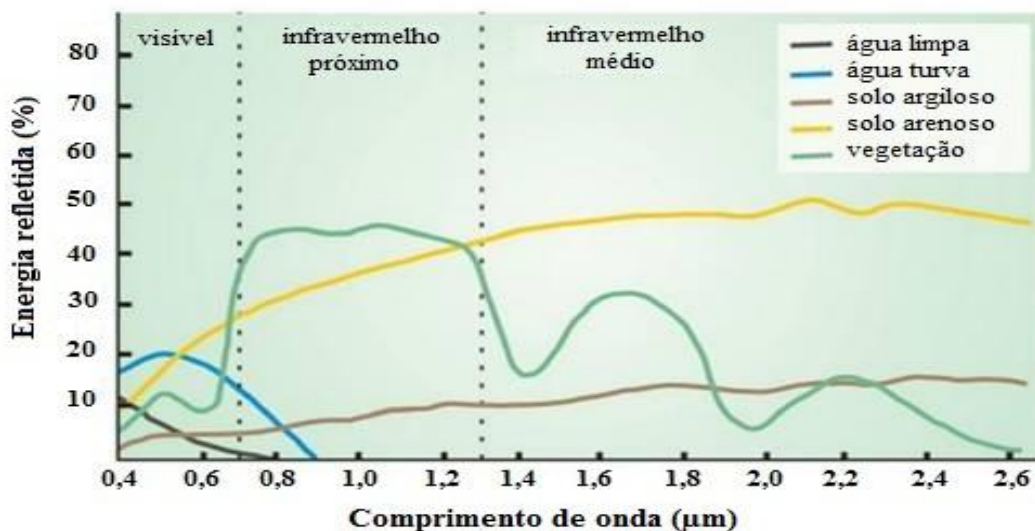


Figura 11 - Curvas características da refletância da água, solo e vegetação verde, apresentando faixas espectrais de absorção da radiação eletromagnética.

Fonte: Florenzano (2002).

3.2.1 Características das imagens de média resolução

De acordo com Moreira et al. (2007), no passado, os resultados de pesquisas com imagens de satélites foram desanimadores decorrente da baixa resolução espacial dos sensores que estão a bordo dos satélites, como é o caso do sensor MMS do Landsat, porém a série Landsat passou por inúmeras inovações, especialmente no que tange à resolução espacial dos sensores.

Conforme Messias (2012), a “resolução espacial está relacionada ao tamanho do pixel, sendo que quanto mais forem observados objetos pequenos, maior a resolução”. Figueiredo (2005) afirma que o sistema Landsat foi o primeiro a desenvolver de forma sistemática imagens terrestres sinópticas de média resolução. Vale ressaltar que o Programa Landsat constitui-se de uma série de oito satélites desenvolvidos pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) nos Estados Unidos.

Os produtos do projeto Landsat têm sido amplamente usados para avaliações espaço-temporais da alteração do uso e cobertura da terra. De acordo com INPE (2015) os dois principais instrumentos imageadores do Landsat 5 eram (MSS) *Multispectral Scanner* e (TM) *Thematic Mapper* e o Landsat 7 o instrumento imageador era o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Os pixels das imagens Landsat 5 e Landsat 7 possuem uma

resolução espacial de 30 metros, com exceção da banda 6, que possui resolução espacial de 120 metros. O uso das bandas espectrais irá depender do estudo que será desenvolvido, o USGS (2015) indica as melhores composições das bandas para cada tipo de estudo, a seguir são apresentados as principais características das composições das bandas espectrais Landsat 5 e Landsat 7 e suas aplicações em estudos ambientais.

- **Bandas 1, 2 e 3 (azul, verde e vermelho):** imagens em “cor natural”, com boa penetração na água, realçando as correntes, a turbidez e os sedimentos. A vegetação nesta composição aparece em tonalidades esverdeadas.
- **Bandas 2, 3 e 4 (verde e vermelho, infravermelho próximo):** define melhor os limites entre o solo e a água, ainda mantendo algum detalhe em águas pouco profundas, e mostrando as diferenças na vegetação que aparece em tonalidades de vermelho.
- **Bandas 3, 4 e 5 (vermelho, infravermelho próximo, infravermelho médio):** mostra mais claramente os limites entre o solo e a água, com a vegetação mais discriminada, aparecendo em tonalidades de verde e rosa.
- **Bandas 2, 4 e 7 (verde, infravermelho próximo, infravermelho distante):** mostra a vegetação em tons verdes e permite discriminar a umidade tanto na vegetação como no solo.
- **Banda 6 (infravermelho termal):** apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, utilizada para detectar propriedades termais da superfície.

A Tabela 3 apresenta as características das bandas espectrais Landsat 5 e Landsat 7.

Tabela 3 - Características espectrais das imagens Landsat 5 e Landsat 7

Bandas Landsat 5 -7	Faixa Espectral (µm)	Resolução Espacial (Metros)
Banda 1 – Azul	0,45 – 0,52	30
Banda 2 – Verde	0,52 – 0,60	30
Banda 3 – Vermelho	0,63 – 0,69	30
Banda 4 – Infravermelho Próximo	0,76 – 0,90	30
Banda 5 – Infravermelho Médio	1,55 – 1,75	30
Banda 6 – Infravermelho Termal	10,4 – 12,5	120
Banda 7 – Infravermelho Distante	2,08 – 2,35	30

Fonte: Adaptada de USGS (2015a).

De acordo com EMBRAPA (2013) a plataforma Landsat-8, lançada no dia 11/02/2013 e que integra a missão *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat), opera com dois instrumentos imageadores, são eles: *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Os produtos do instrumento imageador OLI possui nove bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 metros (bandas de 1 a 7 e 9), banda 8 com resolução de 15 m e as bandas 10 e 11 (Infravermelho Termal) com resolução de 100 m. A seguir são apresentadas as composições principais das bandas espectrais Landsat 8 e sua aplicação nos estudos de uso e ocupação da terra, conforme USGS (2015a).

- **Banda 1 (costeira/aerossol):** esta banda é também denominada de ultra-azul. É utilizada para estudos de áreas costeiras, podendo ser utilizada para estudos que analisam a qualidade do ar ou dispersão de poluentes;
- **Bandas 2 , 3 e 4 (azul, verde e vermelho):** são as bandas utilizadas para composição em cor natural;
- **Banda 5 (infravermelho próximo):** indicada para análise da vegetação e utilização de índices de vegetação, a exemplo o IVAS, IAF e IVDN;
- **Bandas 6 e 7 (infravermelho médio):** são utilizadas principalmente para distinguir terra molhada da terra seca, aplicadas aos estudos geológicos;
- **Banda 8 (pancromática):** basicamente utilizadas para fazer fusões com outras composições de bandas com o objetivo de melhorar a interpretação visual;

- **Bandas 9 (Cirrus):** projetada para detecção de nuvens altas denominadas de Cirrus. Por meio da fusão com outras bandas espectrais, pode-se melhorar a interpretação visual;
- **Bandas 10 e 11 (infravermelho termal):** pertencem ao instrumento imageador TIRS, utilizada para estudar a variação da temperatura da superfície.

A Tabela 4 apresenta as características das bandas espectrais do Landsat 8.

Tabela 4 - Características espectrais da imagem Landsat 8.

Bandas Landsat 8	Faixa Espectral (µm)	Resolução Espacial (metros)
Banda 1 – Costeira/ Aerossol	0,43 – 0,45	30
Banda 2 – Azul	0,45 – 0,51	30
Banda 3 – Verde	0,53 – 0,59	30
Banda 4 – Vermelho	0,64 – 0,67	30
Banda 5 – Infravermelho Próximo	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – Infravermelho Médio	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – Infravermelho Médio	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Pancromatica	0,50 – 0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Infravermelho Termal (TIRS1)	10,60 – 11,19	100
Banda 11 – Infravermelho Termal (TIRS2)	11,50 – 12,51	100

Fonte: Adaptada de USGS (2015a).

As imagens adquiridas por sensores remotos são produzidas inicialmente em preto e branco. Florenzano (2002) esclarece que a “quantidade de energia refletida pelos objetos vai determinar a sua representação nessas imagens em diferentes tons de cinza, entre o branco (quando refletem toda a energia) e o preto (quando absorvem toda a energia)”. A partir da sobreposição das bandas espectrais é possível obter imagens coloridas e a cor do objeto depende da energia refletida por ele. As composições das bandas espectrais (sobreposição das camadas espectrais) são utilizadas para realçar determinado objeto da superfície terrestre.

É importante salientar que, o Landsat 8 inclui faixas adicionais e as combinações utilizadas para criar composições RGB são diferente do Landsat 5 e Landsat 7. Por exemplo, no Landsat 5 ou Landsat 7 as bandas 4, 3, 2 são usadas para criar uma imagem infravermelha, enquanto que para criar uma composição infravermelho com as bandas espectrais do Landsat 8 são usadas as bandas 5, 4, 3 (USGS, 2013). A Figura 12

exibe algumas combinações de bandas comuns em composição RGB para Landsat 7 ou Landsat 5 e Landsat 8.

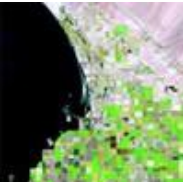
Composição RGB	Resultado	Landsat 5 e Landsat 7	Landsat 8
	Infravermelho	4, 3, 2	5,4,3
	Cor Natural	3, 2, 1	4,3,2
	Falsa Cor	5,4,3	6,5,4
	Falsa Cor	7,5,3	7,6,4
	Falsa Cor	7,4,2	7,5,3

Figura 12 - Combinações de bandas espectrais em composições RGB para Landsat 5 ou Landsat 7 e Landsat 8.

Fonte: adaptado de USGS (2013).

3.2.2 Sensoriamento remoto no estudo de ilhas de calor

Para analisar o fenômeno de Ilhas de Calor existe a necessidade de utilizar instrumentos e procedimentos que possibilitem avaliar quais as modificações da temperatura estão acontecendo nos centros urbanos e assim monitorar possíveis alterações ambientais nas cidades. Trabalhos já desenvolvidos sobre a temática abordada, fenômeno das Ilhas de Calor, apresentam o sensoriamento remoto combinado com o uso de dados

climatológicos e imagens de satélite como instrumento importantes na análise deste fenômeno, a exemplo, cita-se os estudos de Barbosa e Vecchia (2009); Li et al. (2011); Lombardo (2011); Xiong et al. (2012).

Barbosa e Vecchia (2009) apontam que a utilização de dados de sensoriamento remoto captados na região do infravermelho termal permite a realização de estudos do comportamento térmico das diferentes tipologias de cobertura do solo e assim a obtenção de informações relativas à Temperatura Aparente da Superfície (*Land Surface Temperature* – LST). Os resultados do seu estudo apontaram que as máximas absolutas ocorreram nas áreas de comércio e serviço e nas áreas livres com valores de 48,7°C. Dentro da zona urbana, os espaços que apresentaram menor temperatura foram as áreas verdes, com valor médio de 29,7°C. Os autores apontaram também que o uso combinando de sensoriamento remoto e imagens orbitais, neste caso imagens de satélite Landsat 7 ETM+, são importantes ferramentas de análise na identificação de ilhas de calor urbanas, mostrando-se eficaz quanto à espacialização dessas anomalias térmicas na malha urbana.

Li et al. (2011) mapearam através de técnicas de sensoriamento remoto e dados do sensor MODIS, a variação de temperatura na cidade de Lianyungang, localizada na China. O objetivo do estudo foi estimar as mudanças de temperatura da superfície dos anos de 2000 e 2008. Os dados da temperatura de superfície e processamento digital de imagens foram usados para análise das características temporais e espaciais da ilha de calor na cidade de Lianyungang. Com base em dados de pré-processamento, o trabalho discute principalmente a relação entre a ilha de calor, vegetação, iluminação e alterações na paisagem feitas pelo homem. Os resultados mostraram que as ilhas de calor da cidade têm uma relação estreita com o grau de urbanização (edifícios da cidade, número de população, densidade populacional, o desenvolvimento da indústria, transporte, etc.), condições geográficas e atividades humanas.

Xiong et al. (2012) utilizaram imagens Landsat TM e ETM+, para os anos de 1990, 2000, 2005 e 2009, para investigar as variações espaço-temporais na temperatura da superfície e ao longo de diferentes zonas urbanas e rurais. Os autores investigaram a formação de ilhas de calor a partir da análise das estimativas de temperaturas de superfície. O estudo considera, principalmente, a relação entre as alterações de temperatura e o índice de vegetação, neste caso, o estudo analisou o IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Os resultados mostram que: (a) o efeito da ilha de calor existiu, sobre o período de 1990 a 2009, e que as anomalias de alta temperatura foram associadas com a

área urbana, densamente povoada e altamente industrializada; (b) ilhas de calor são representadas pela diferença entre a média da temperatura aparente da superfície na área do centro e da área suburbana, e por fim que (c) as alterações de temperatura estão relacionadas com a negativamente do IVDN.

Em pesquisa desenvolvida por Lombardo (2011), com o uso de geotecnologias na análise das mudanças climáticas na metrópole de São Paulo, o autor aponta que “para extrair informações sobre o ambiente urbano, as técnicas de processamento digital de imagens detalham mais a categorização dos alvos urbanos”. Com base nos dados e nas análises realizadas, pôde-se constatar que as temperaturas superficiais terrestres apresentaram certo padrão de variação espacial. Os resultados do estudo apontaram um acentuado contraste de temperatura entre áreas de vegetação e áreas urbanas, em algumas áreas enquanto que a temperatura na vegetação mais densa, como por exemplo, no caso das florestas chegava a 16°C, e que em alguns setores do centro de São Paulo as temperaturas chegaram a 28°C. De acordo com o autor isto acarreta aos moradores certo desconforto térmico, e interfere na qualidade do ar, prejudicando a qualidade de vida da população.

Outros pesquisadores também utilizaram o sensoriamento remoto como método de avaliação do fenômeno de ilhas de calor através da banda termal das imagens de satélite para estimar as temperaturas no ambiente urbano e adquirir informações de temperatura da superfície. Cita-se a exemplo, o estudo de Coelho e Corrêa (2013) que com a aplicação de técnicas de geoprocessamento, combinado ao uso de imagens de satélite, permitiu apontar que em setores da cidade com a presença de vegetação, a exemplo, as área de manguezal, foi detectado temperaturas mínimas de 24,7°C e as maiores temperaturas foram identificados nas áreas construídas, a exemplo, locais com telhas, registrando valores superiores a 30,6°C. As ilhas de calor ocorrem praticamente em todos os setores da área denominada Urbano/Industrial, com temperaturas sempre superiores a 29°C As alterações de temperatura ocorreram principalmente nas regiões como o parque industrial e o aeroporto, situados na porção centro-norte da cidade.

Assim, entende-se que o uso das geotecnologias, especialmente o uso de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, são fundamentais para a análise de questões relacionadas ao uso e ocupação da terra e do fenômeno de ilhas de calor, a fim de auxiliar no planejamento das cidades.

3.3 Parâmetros biofísicos na análise da cobertura da terra

A estimativa dos parâmetros biofísicos como os índices de vegetação, albedo, temperatura de superfície, saldo de radiação, entre outros índices, tem sido relevante para o entendimento de mudanças relacionadas ao uso e cobertura da terra e alterações de temperatura da superfície. Bezerra (2014) acrescenta que a estimativa dos parâmetros biofísicos da superfície por técnicas de sensoriamento remoto tem sido aplicada para o manejo de recursos naturais, sendo considerada uma boa alternativa de monitoramento.

Diversos trabalhos científicos têm usado a estimativa dos parâmetros supracitados para avaliar e monitorar a qualidade ambiental. Neste contexto, estudos mais recentes, a exemplo de Julien (2006), Teixeira et al. (2009), Lopes et al. (2010), Oliveira et al. (2012), Rodrigues et al. (2013), Andrade et al. (2013) e Silva (2014) estimaram com uso de técnicas de sensoriamento remoto e uso de imagens de satélite alguns parâmetros biofísicos, com destaque para a estimativa dos índices de vegetação, albedo e temperatura de superfície.

Em estudo desenvolvido por Julien et al. (2006), a estimativa dos parâmetros biofísicos mostraram a diminuição do IVDN em diversas áreas e o aumento do índice em outros locais. O estudo mostrou ainda um aumento na temperatura da superfície na média de 2,5°C. Os autores esclarecem que o monitoramento das séries temporais IVDN só pode evidenciar se determinadas áreas tiveram aumentos ou diminuições de vegetação, enquanto o uso combinado com séries temporais de temperatura da superfície terrestre permite determinar se as mudanças afetam o comportamento sazonal da vegetação existente, ou se as mudanças são devidas a alterações na cobertura do solo.

Conforme Lopes (2010), os “indicadores são integrados a informações sintéticas que podem prover dados em estágio inicial, situação e evolução de processos físicos, químicos, biológicos e antropogênicos na dinâmica de ecossistemas”. Em seu estudo que analisou as mudanças na cobertura e uso do solo a partir da estimativa dos parâmetros biofísicos (índices de vegetação, albedo e temperatura da superfície) foi possível identificar que a área analisada está sofrendo forte impacto da antropização. Conforme discutido pelo autor, a estimativa dos parâmetros biofísicos mostrou-se eficiente na realização dos estudos da degradação ambiental e análise da evolução do uso e cobertura do solo.

3.3.1 Degradação ambiental e uso de índices de vegetação (IVDN, IVAS e IAF)

A degradação ambiental ocasionada pelo desmatamento intensivo devido à industrialização e urbanização está se tornando cada vez mais comum (VELÁSQUEZ et al., 2003; WANG et al., 2007; WARREN, A. 2002). A degradação ambiental, na maioria das vezes, é ocasionada pelo homem, por meio de ações antrópicas e modifica os ecossistemas, assim como destaca Guerra e Guerra (2009, p.184), de acordo com os autores a degradação ambiental é:

Causada pelo homem, que, na maioria das vezes não respeita os limites impostos pela natureza. A degradação ambiental é mais ampla que a degradação dos solos, pois envolve não só a erosão dos solos, mas também a extinção de espécies vegetais e animais, a poluição de nascentes, rios, lagos e baías, o assoreamento e outros impactos prejudiciais ao meio ambiente e ao próprio homem.

A literatura apresenta vários conceitos para degradação ambiental. De acordo com Rubira (2016) “a degradação ambiental é proveniente da utilização sem medidas e sem preocupação com a sustentabilidade do meio ambiente por parte do homem, originando o esgotamento dos recursos naturais a diferentes níveis de escalas”. Lima e Roncaglio (2001), acerca desta mesma temática, diz que “a expressão degradação ambiental qualifica os processos resultantes dos danos ao meio ambiente qualquer lesão ao meio ambiente causada por ação de pessoa, seja ela física ou jurídica”.

Porém, cabe ressaltar que a degradação ambiental também pode ser ocasionada por processos naturais. Cunha e Guerra (1998) apontam que a degradação ambiental também pode ocorrer como consequência de certos processos naturais, como lixiviação, erosão e movimentos de massa, no entanto, a degradação ambiental mais comum é consequência das intervenções antrópicas no ambiente.

Vários estudos analisaram as taxas de degradação ambiental, cita-se a exemplo os estudo desenvolvidos por Amissah-Arthur et al. (2000) e Meneguzzo (2006). No estudo de Amissah-Arthur et al. (2000), foi utilizado uma combinação de uma série de imagens de satélite e dados físicos e socioeconômicos dentro de um ambiente GIS para avaliar as taxas de degradação da terra no Sahel. O autor identificou que as altas taxas de degradação de terras na área analisada ocorrem devido às alterações na paisagem ocasionada pelo crescimento dos índices demográficos e pela intensificação das atividades agrícolas.

Meneguzzo (2006) no seu estudo que tem por objetivo analisar a degradação ambiental na área urbana da bacia do Arroio Gertrudes, localizada em Ponta Grossa (PR),

mostra que a presença de diversos processos de degradação ambiental na área estudada é fruto da interação de diferentes fatores, e cada processo de degradação constitui-se num caso específico. Os resultados do estudo mostraram que a degradação ambiental na parte urbana da área analisada (bacia do Arroio Gertrudes) é consequência principalmente de intervenções antrópicas, a exemplo das causas que contribuíram para a elevação das taxas de degradação. O autor cita a presença de solo exposto, lixo a céu aberto, assoreamento do leito fluvial, canalização e lançamento de águas servidas. O autor salienta ainda que a existência dos processos de degradação ambiental está associada principalmente à ausência de planejamento urbano e faz-se necessário a implantação de projetos de planejamento ambiental nas diversas esferas competentes (federal, estadual e municipal).

O monitoramento da distribuição espaço-temporal dos índices de vegetação através de técnicas de sensoriamento remoto é aplicado para finalidades diversas: agricultura, monitoramento de desmatamento e análise espaço-temporal da evolução da cobertura da vegetação. Nesse contexto Ponzoni e Shimabukuro (2007) esclarecem que “os estudos em vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, fundamentam-se na compreensão da aparência que uma dada cobertura vegetal assume em um determinado produto de sensoriamento remoto”.

De acordo com Gilabert (1997), os índices de vegetação têm em comum a utilização da refletividade nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, pois 90% dos dados relativos à vegetação estão contidas nas bandas espectrais dessas faixas. Ponzoni e Shimabukuro (2007) corroboram com o autor supracitado e evidencia que “existem diversos índices propostos na literatura com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo”, cita-se a exemplo os índices de vegetação CTVI (*The Corrected Transformed Index*), RVI (*Ratio Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), GEMI (*Global Environment Monitoring Index*) e NDSVI (*Normalized Difference Senescence Vegetation Index*). Porém a literatura mostra que os índices mais utilizados para analisar a cobertura vegetal são Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) e Índice de Área Foliar (IAF).

Neste estudo, os índices de vegetação analisados foram o IVDN, IVAS e o IAF, que são apresentados e descritos na Tabela 5, vale salientar que estas equações, serão reapresentadas na metodologia deste estudo, com maiores detalhes.

Diversos estudos já foram realizados com os índices de vegetação (IVDN, IVAS e IAF) com o objetivo de identificar as alterações do uso e ocupação da terra, dentre os quais podemos citar os trabalhos realizados por Buermann et al. (2002), Bertolo et al. (2005), Jiang et al. (2006), Rosembach et al. (2005) e Demarchi (2011). Na pesquisa realizada por Bertolo et al. (2005), foram determinados os índices de vegetação da área urbana de Curitiba com o uso de imagens Landsat TM de 1986, 1999 e 2002. A estimativa dos índices de vegetação mostrou que entre 1986 e 2002 houve um acréscimo de 9% na cobertura vegetal do município. Os autores do estudo atribuem esse aumento dos índices de vegetação ao longo dos anos aos avanços das políticas públicas urbanas.

No estudo realizado por Rosembach et al. (2005), a partir da estimativa do IVDN, foi possível analisar a área urbana do município de Goiânia, segundo a quantidade de vegetação. Conforme o autor, esta é uma das fases do processo de diagnóstico de impactos ambientais, e a partir das estimativas deste índice de vegetação pode-se formular também uma análise primária, na qual são determinadas as zonas nas quais estão ocorrendo maior impacto nos recursos naturais.

Vale salientar que a estimativa dos índices de vegetação é fundamental também na análise da variação de temperatura de superfície assim como apontado nos estudos de Polizel (2009); Barbosa e Silva Junior (2010) e Almeida et al. (2015). De acordo com Barbosa et al. (2010), os valores de IVDN na região estudada tendem a aumentar nos anos de La Niña, considerados anos chuvosos, com o aumento da densidade da vegetação, e os valores de IVDN tendem a diminuir nos anos de El Niño, considerados anos secos. Assim, a variação do IVDN em certas regiões podem ser características dos impactos oriundos das condições meteorológicas, mostrando a estreita relação entre os índices de vegetação e temperatura.

Diante do apresentado nos resultados dos estudos mencionados, considera-se importante a estimativa destes índices na análise da evolução temporal da cobertura da vegetação nas áreas urbanas das cidades, com o objetivo de fornecer informações a cerca da qualidade ambiental e apresentam análises propulsoras no planejamento urbano.

Tabela 5 - Descrição dos Índices de Vegetação.

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	EQUAÇÃO	DESCRIÇÃO
Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN)	$IVDN = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V}$ onde: ρ_{IV} = a banda espectral no infravermelho próximo; ρ_V = é a banda espectral do vermelho	O IVDN foi proposto por Rouse (1974). Este índice varia de -1 a 1. Valores negativos representam áreas sem presença de cobertura de vegetação (corpos d'água ou solo exposto) e valores próximo a 1 representa áreas com máximo vigor de vegetação. O cálculo do índice de vegetação do IVDN é a razão entre as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, onde são realizadas as diferenças espectrais entre solo e vegetação.
Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS)	$SAVI = \left(\frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \right)$ onde: L = 1 (baixas densidades de vegetação); L= 0,5 (médias densidades de vegetação); L= 0,25 (altas densidades de vegetação)	O IVAS foi proposto por Huete (1988). Este índice possui a propriedade de minimizar os efeitos do solo sobre a vegetação. Este índice foi desenvolvido como uma modificação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada com a proposta de minimizar os efeitos da variabilidade do tipo e densidade da vegetação. De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2007), L é uma constante e pode apresentar valores de 0 a 1.
Índice de Área Foliar (IAF)	$IAF = -\ln \left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59} \right)$	A estimativa do IAF é feita de acordo com a equação proposta por Allen (2002). Este índice é definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação, sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem.

Fonte: Organizado pela autora.

3.3.2 Albedo da superfície

Entre os parâmetros biofísicos empregados na análise do uso e ocupação da terra, destaca-se o albedo, que é caracterizado pela capacidade que os objetos da superfície possuem de refletirem a radiação solar que incide sobre eles. De acordo com Callejas et al.

(2015) “albedo é uma medida adimensional correspondente à percentagem da radiação solar incidente que é refletida pela superfície, calculado a partir de dados de radiação solar global e a emissividade”.

A área urbana de um município pode apresentar uma grande variação dos valores do albedo devido ao conjunto de superfícies heterogêneas dentro da malha urbana, por exemplo: telhado, vegetação, pavimento, solo exposto e corpos de água (Gamarra et al., 2014). Salienta-se também que os valores do albedo variam de acordo com a cor e rugosidade do objeto da superfície terrestre. Objetos com a cor branca refletem a maioria da luz que o atinge e tem um alto albedo, enquanto objetos com tons escuros absorvem a maior parte da luz que o atinge, indicando um albedo baixo. A Figura 14 representa a variação do albedo dos materiais da superfície urbana.

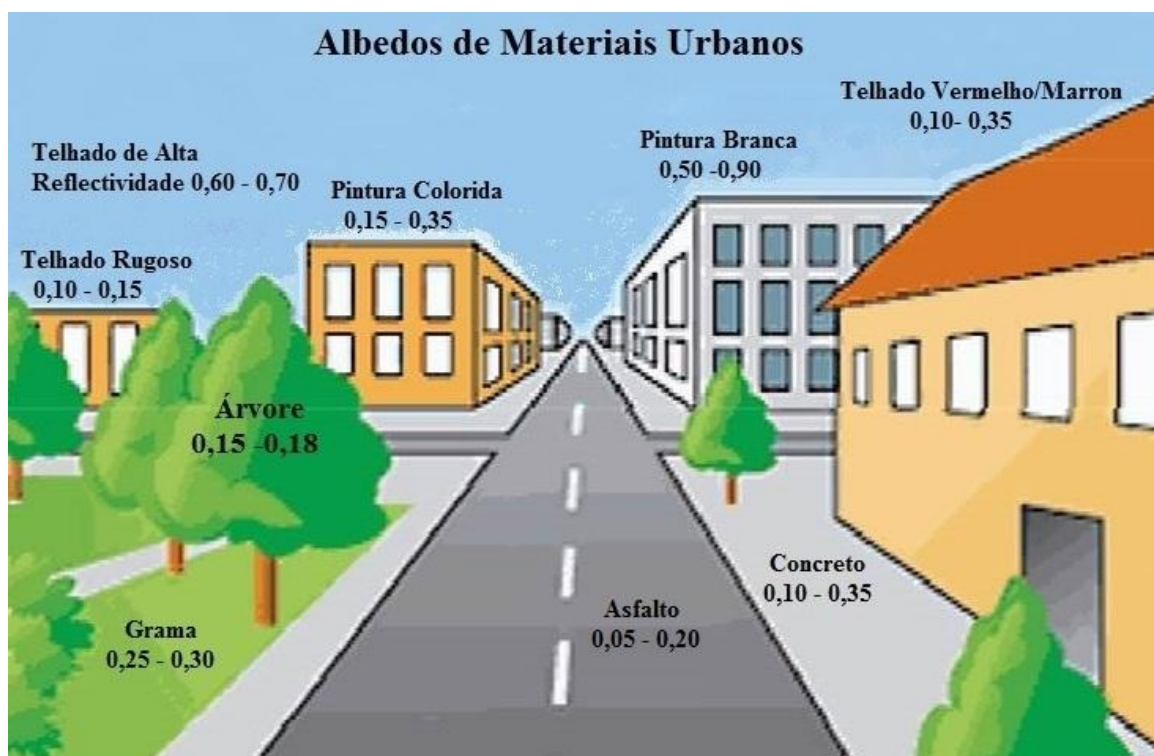


Figura 13 - Albedos de várias superfícies urbanas.

Fonte: adaptado de Rosenthal et al. (2008).

O albedo pode influenciar significativamente a temperatura da superfície contribuindo para modificações no clima local, assim como pode ser observado na Figura 14 que representa o efeito do albedo na temperatura de superfície. Nota-se que a área com a faixa branca (alto albedo) na parede tijolo é cerca de 5–0°F (3–5°C) mais frio do que a área mais escura (EPA, 2008b).

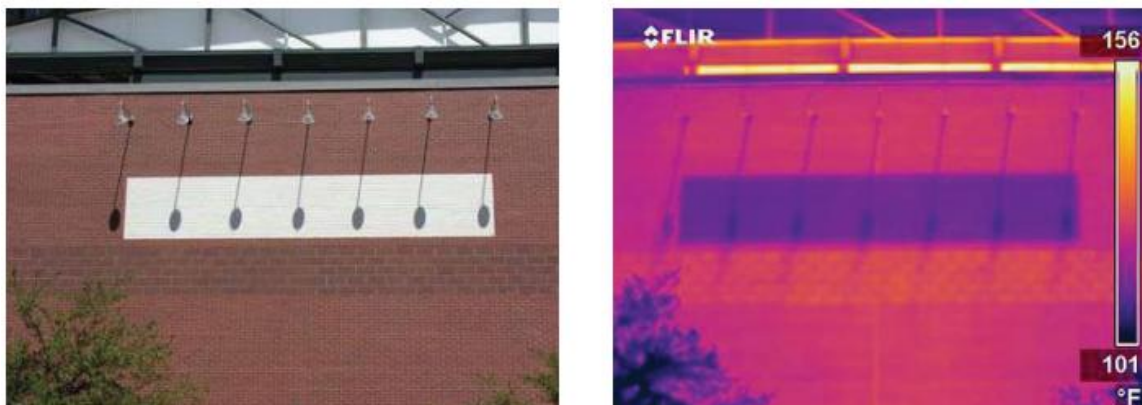


Figura 14 - O efeito do albedo na temperatura da superfície.

Fonte: EPA (2008b).

3.3.3 Temperatura de superfície e saldo de radiação

As alterações do uso e ocupação da terra são uma das principais causas de diferentes impactos ambientais, dentre os impactos ambientais destacam-se as alterações da temperatura superficial (T_s). A temperatura de superfície está relacionada ao fluxo de calor dado em função da energia que entra e sai do corpo, e é de grande importância para o entendimento entre as interações da superfície terrestre e a atmosfera (STEINKE et al., 2010).

Conforme Lombardo (1985), as alterações do uso e ocupação da terra em decorrência do crescimento urbano, o grande número de veículos, o crescimento das indústrias, e a diminuição das áreas verdes criam grandes alterações na atmosfera local, transformando a cidade em uma grande fonte de calor antropogênico. Nessa perspectiva, a estimativa da temperatura de superfície é de fundamental importância nos estudos da climatologia urbana, pois possibilita analisar quais alterações do campo térmico estão ocorrendo no ambiente urbano das cidades.

A Figura 15 demonstra como áreas verdes no ambiente urbano são importantes para a diminuição das altas temperaturas. O resultado do estudo apresentado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) mostrou que em um dia típico na cidade de Chicago, a temperatura do telhado verde é em média 80°F (40°C) mais fria do que o telhado convencional vizinho (EPA, 2008c).



Figura 15 - Influência da vegetação na temperatura da superfície.
Fonte: EPA (2008c)

O uso de geotecnologias em estudos de temperatura de superfície tem sido frequentemente utilizado, a exemplo cita-se o uso das imagens de satélite, mais especificamente a banda termal, que contém os dados de temperatura da superfície. Leite e Brito (2012) apontam que a estimativa da temperatura de superfície por sensores remotos “possui como base de suporte os estudos das variáveis oriundas do balanço de radiação à superfície, como fluxo de radiação de onda curta e, principalmente, os de onda longa que envolve a região do infravermelho”. Nesta perspectiva, diversos estudos têm sido desenvolvidos, como exemplo, cita-se: Andrade et al. (2013), Santos et al. (2013), Paiva (2005) e Souza (2014).

Em conformidade com Souza (2014), a estimativa da temperatura da superfície é considerada uma variável importante para o monitoramento da variabilidade bioclimática de um determinado lugar. Na pesquisa elaborada pela autora supracitada, a estimativa da temperatura de superfície para a cidade de João Pessoa - PB revelou que a variação da temperatura em algumas partes da região analisada está relacionada com a densidade urbana, quantidade de vegetação e com a morfologia da cidade. Os resultados do estudo mostraram que as áreas menos adensadas apresentaram temperaturas menos elevadas e as regiões com as temperaturas mais elevadas foram observadas nas áreas com maior densidade urbana.

Andrade et al. (2013), para estimar a temperatura de superfície no município de Santarém com o uso de imagens termais TM/LANDSAT, constataram que as maiores temperaturas encontram-se na zona central do município. De acordo com os autores, os valores máximos da temperatura de superfície são decorrentes da impermeabilização do solo e outras fontes de calor antropogênicas. Os autores evidenciam que os procedimentos adotados no estudo mostraram-se como uma boa ferramenta para estimativa da temperatura, permitindo identificar áreas com maior variação de temperatura de superfície.

O saldo de radiação (R_n) é um parâmetro que representa a quantidade de energia disponível para diversos processos físicos, químicos, biológicos e meteorológico e é obtido através da soma algébrica dos balanços de radiação de ondas curtas e longas. Quantificá-lo é importante para a estimativa do balanço de energia e para aplicações ambientais, a exemplo do monitoramento e alterações relevantes no regime climático (BATISTA, 2013).

Di Pace et al. (2008) corroboram com o autor supracitado e reafirma que “o conhecimento do saldo de radiação é fundamental em estudos agrometeorológicos, de monitoramento climático e previsão de tempo”. Conforme o autor aponta, existem diversas formas de medições deste parâmetro, porém ele salienta que “quando há necessidade de estimativa desse elemento climático em grandes áreas, as técnicas baseadas em medições realizadas por sensores orbitais são mais apropriada porque reúnem grande cobertura espacial e têm baixo custo operacional”. Neste sentido, alguns estudos apresentam a estimativa do saldo de radiação à superfície estimada a partir de sensores orbitais, a exemplo, Andrade e Corrêa (2014) e Souza (2014)

No estudo desenvolvido por Andrade e Corrêa (2014), as autoras apontam que a “estimativa do saldo de radiação (R_n) em ambientes urbanos é de fundamental importância para o entendimento e a quantificação dos impactos que as estruturas presentes nas áreas urbanas causam nas trocas de energia entre a superfície e a atmosfera”. O resultado do estudo mostrou que na estimativa do saldo de radiação, os maiores valores foram encontrados nas superfícies naturais, enquanto que os menores índices foram observados em superfícies urbanas e solo exposto.

Resultado similar também foi apresentado no estudo de Souza (2014) onde foram encontrados os maiores valores do saldo de radiação sobre vegetação arbórea/arbustiva e água. Os resultados apontaram que entre os anos de 2006 e 2010 houve mudanças significativas dos valores do saldo de radiação. A variação no ano de 2006 foi de 0 a 600 W/m² e no ano de 2010 em algumas áreas da malha urbana a variação do R_n foi de 600–650 W/m². A autora salienta que tal variação pode ter ocorrido em decorrência do adensamento da área urbana e sua expansão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados os procedimentos metodológicos envolvidos neste estudo, os quais incluíram: aquisição de dados, pré-processamento das imagens de satélite, classificação do uso e ocupação da terra, calibração de imagens, estimativa dos parâmetros biofísicos, amostragens e análises de dados. O fluxograma mostrado na Figura 16 apresenta as etapas dos procedimentos metodológicos para o desenvolvimento da pesquisa.

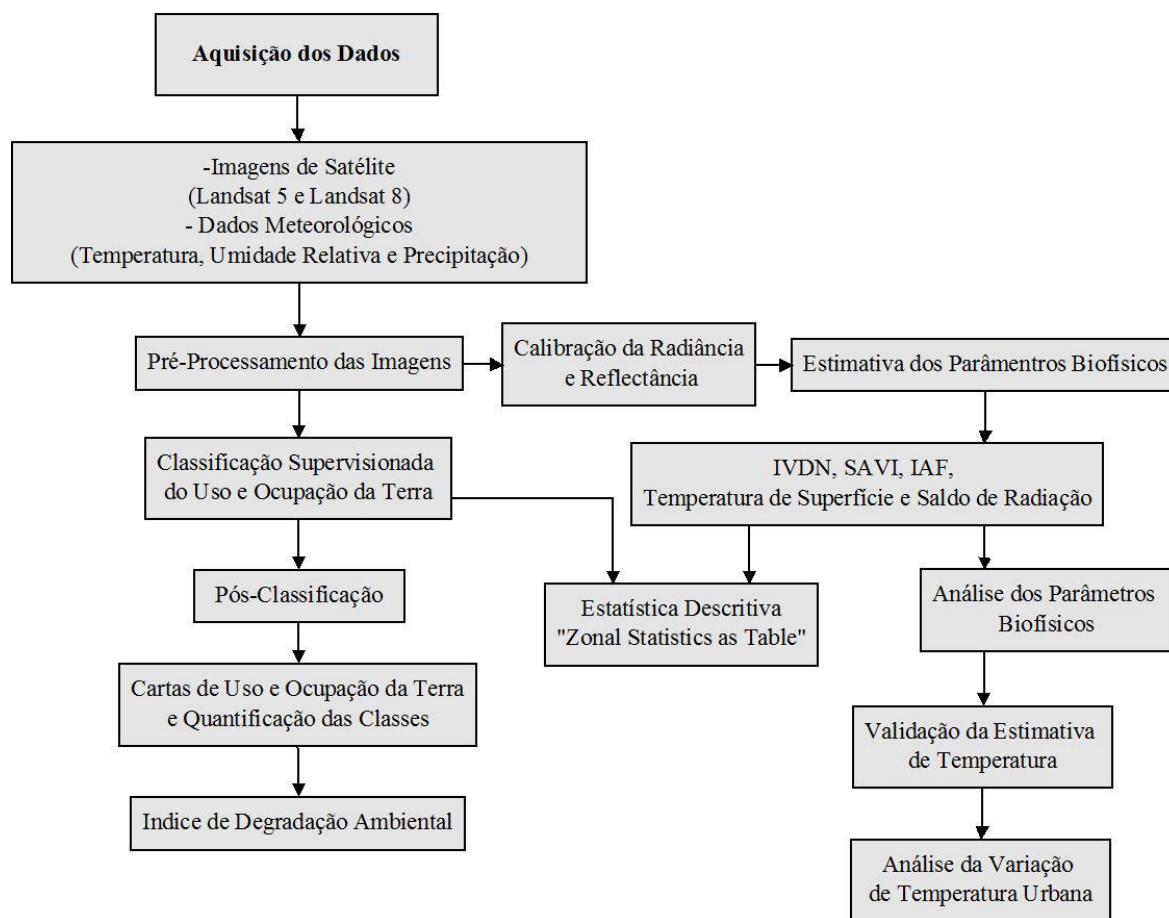


Figura 16 - Fluxograma referente aos procedimentos metodológicos adotados neste estudo.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Materiais

4.1.1 Obtenção das imagens orbitais

Para este trabalho, foram utilizadas quatro imagens de satélite, sendo três imagens TM/ Landsat 5 (02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010) e uma imagem do sensor OLI/Landsat 8 (27/09/2014). Todas as imagens são da órbita 220 e ponto 62, disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), disponível no endereço eletrônico <http://glovis.usgs.gov>.

A escolha das imagens levou em consideração o menor percentual de cobertura de nuvens para as cenas selecionadas, considerando que este é um fator importante para a computação dos parâmetros que serão analisados neste estudo, pois imagens com alto índice de cobertura de nuvens podem superestimar os resultados das análises. Os anos de estudo também foram definidos com base na disponibilidade dos dados fornecidos pelas estações meteorológicas. A Tabela 1 apresenta algumas informações das imagens utilizadas.

Tabela 6 - Parâmetros obtidos da passagem do satélite e na estação meteorologia (OMM: 82280- São Luís), para o cômputo dos parâmetros biofísicos e da temperatura estimada.

Data da Imagem	DSA	Hora de Passagem	E (°)	CosZ	dr	T _a (°C)	UR (%)
02/08/1988	214	12:35:41	48,80639	0,75248877	0,97173376	25.4	61
14/06/1999	265	12:42:55	48,648976	0,75067649	0,99504805	28.2	77
04/02/2010	35	12:55:50	54,852142	0,81766944	1,02718947	29.6	73
27/09/2014	270	13:05:04	64,971769	0,9060996	0,99787109	29.5	64

DSA= dia sequencial do ano; E (°) = ângulo de elevação solar; Cos Z = cosseno do ângulo zenital solar; dr = inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; T_a = temperatura do ar em °C e UR % = umidade relativa do ar em porcentagem.

Neste estudo foi utilizada também uma imagem do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, para extração de dados morfométricos da área de estudo, disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), disponível no endereço eletrônico <http://earthexplorer.usgs.gov>.

A Tabela 2 apresenta as principais características das sete bandas espectrais das imagens do satélite Landsat 5 sensor TM e apresenta ainda a descrição dos coeficientes de calibração mínimo (a) e máximo (b), irradiância solar espectral no topo da atmosfera (ESUN_λ) e coeficientes das diferentes bandas usadas no cômputo do albedo (W_{λi}). Os coeficientes utilizados são propostos por Chander et al. (2007).

Tabela 7 - Descrição dos coeficientes de calibração das imagens Landsat 5 sensor TM.

Bandas	Coeficiente de Calibração (W m ⁻² μm ⁻¹)						ESUN _λ (W m ⁻² μm ⁻¹)	W _{λi}
	De 01/03/1984 até 04/05/2003		De 05/05/2003 até 01/04/2007		Após 02/04/2007			
	a	b	a	b	a	b		
1 (azul)	-1,52	152,10	-1,52	193,00	-1,52	169,00	1957	0,293
2 (verde)	-2,84	296,81	-2,84	365,00	-2,84	333,00	1826	0,274
3 (vermelho)	-1,17	204,30	-1,17	264,00	-1,17	264,00	1554	0,233
4 (IV-próx.)	-1,51	206,20	-1,51	221,00	-1,51	221,0	1036	0,155
5 (IV-médio)	-0,37	27,19	-0,37	30,20	-0,37	30,2	215,0	0,032
6 (IV-termal)	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1,2378	15,303	-	-
7 (IV-médio)	-0,15	14,38	-0,15	16,50	-0,15	16,50	80,67	0,012

Fonte: Chander et al. (2007).

A Tabela 8 apresenta os coeficientes de calibração da imagem OLI/Landsat 8 (fatores multiplicativos e fatores aditivos) para o cálculo da radiancia e reflectância espectral da imagem de 27/09/2014. Na Tabela 8 são apresentados também a irradiância solar espectral no topo da atmosfera (ESUN_λ), os coeficientes das diferentes bandas usadas no cômputo do albedo (W_{λi}). Os dados apresentados estão disponíveis no ficheiro de metadados da imagem.

Tabela 8 - Descrição dos coeficientes de calibração das imagens Landsat 8 sensor OLI.

Bandas	Coeficientes de Calibração Radiância		Coeficientes de Calibração Reflectância		ESUN _λ	W _{λi}
	Fator multiplicativo (M _L)	Fator aditivo (A _L)	Fator multiplicativo (M _R)	Fator aditivo (A _R)		
2 - (azul)	0.012798	63,98789	0,00002	-0,1	2001,688639	0,300
3 - (verde)	0.011793	58,96429	0,00002	-0,1	1844,538991	0,276
4 - (vermelho)	0.0099445	49,72201	0,00002	-0,1	1555,419123	0,233
5 - (IV-próx.)	0.0060855	30,42739	0,00002	-0,1	951,8389612	0,142
6 - (IV-médio)	0.0015134	-7,56702	0,00002	-0,1	236,7136738	0,035
7 - (IV-médio)	0.0005101	-2,55049	0,00002	-0,1	79,78517539	0,011
10 - (termal)	0.0003342	0,1	-	-	-	-

4.1.2 Dados meteorológicos das estações de superfície

Os dados meteorológicos de temperatura do ar e umidade relativa, utilizados para a estimativa dos parâmetros biofísicos, foram adquiridos na estação meteorológica de São Luís - MA (OMM: 82280). Essa estação pertence à rede automática de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação meteorológica está localizada na Latitude $-2,53^\circ$, Longitude $-44,21^\circ$, e altitude 50,86 m (Figura 17).

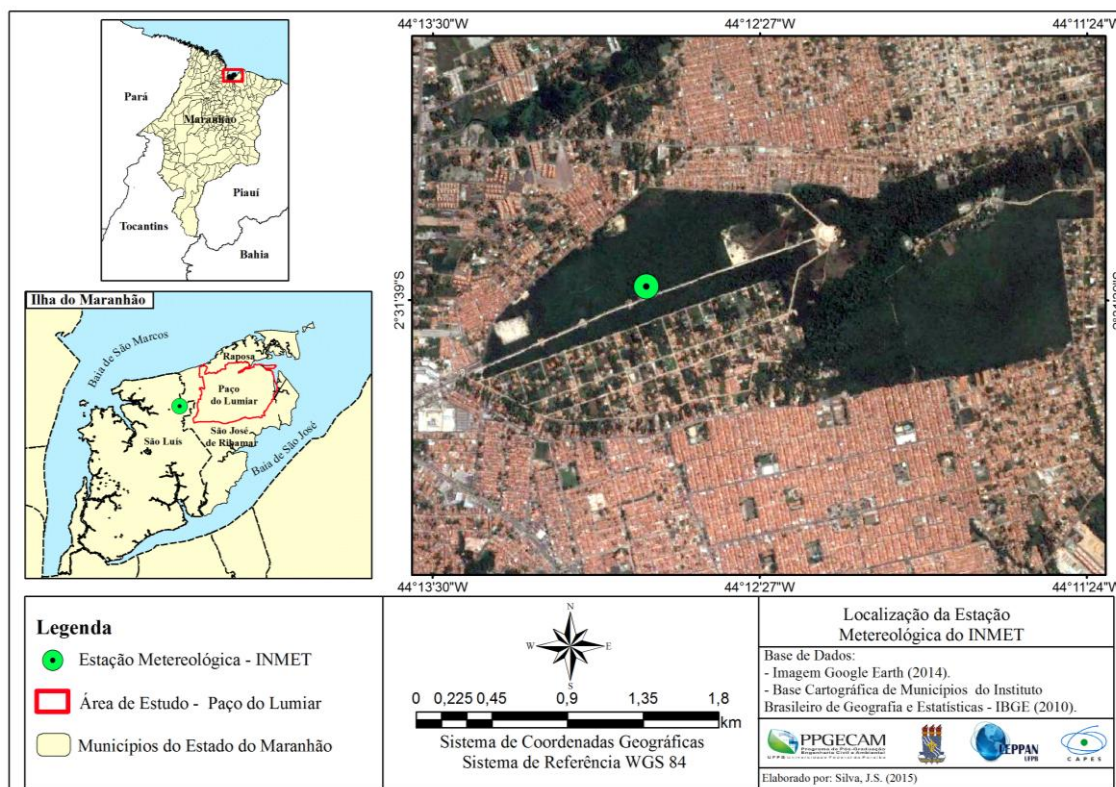


Figura 17 - Localização da estação meteorológica do INMET.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Métodos

4.2.1 Pré-Processamento das imagens de satélite

Esta etapa consistiu no processo de ajuste na projeção das imagens de satélite. Tal procedimento possibilitou a alteração das imagens para o sistema de coordenadas do hemisfério sul (código EPSG 32723), pois, as imagens adquiridas no *website* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) estão disponíveis para consulta em sistema de coordenadas do hemisfério Norte (código EPSG 32623). Assim, se faz necessário uma reprojeção para o hemisfério sul. Salienta-se que as imagens adquiridas no USGS são

ortorretificadas, dispensando a etapa de ortorretificação das imagens de satélite utilizadas nesta pesquisa.

Ainda na etapa do pré-processamento, realizou-se o empilhamento (sobreposição) das bandas espectrais das imagens do Landsat 5 e Landsat 8, para que fossem tratadas. Na etapa seguinte, foi realizado o recorte das imagens, com os limites 2°27'14.1"S e 44°21'40.77" O e 2°35'41.01"S e 43°59'15.72"O. Este limite envolve a área do município de Paço do Lumiar e áreas vizinhas ao município. O recorte da imagem teve como propósito facilitar o processamento das imagens, tornando os processamentos mais rápidos.

Para iniciar o processo de classificação das imagens utilizadas neste estudo, foi gerado a composição das bandas espectrais para melhor identificar as classes que seriam mapeadas. Para as imagens TM/Landsat 5, foi utilizada a composição das bandas 3(B), 5(G), 4(R) e para a imagem do OLI/Landsat 8 foram utilizadas as bandas 4(B), 5(G), 6(R). Em seguida foram criadas cinco classes de uso e ocupação da terra: urbano, vegetação arbustiva/arbórea, vegetação arbórea/herbácea, mangue e água. A escolha das classes de uso e ocupação da terra levou em consideração elementos com maior representatividade na paisagem.

Após definir as classes mapeadas, foi realizado a aquisição das amostras dos *pixels* para cada classe. Estas amostras foram utilizadas para treinar o algoritmo da classificação para o mapeamento do restante da imagem. Após a coleta das amostras de uso da terra, foi realizada a classificação da imagem utilizando a classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança, utilizando limiar de aceitação de 100%. A classificação foi realizada no SPRING (Sistema de Informações Georreferenciadas), versão 5.2.7.

Para corrigir erros de classificação na área de estudo, foi realizada a pós-classificação das imagens, empregando o método da edição matricial através do *software* ArcGIS 10.1[®]. Este procedimento possibilitou eliminar erros de classificação através da edição de áreas em determinadas classes e assim fazer a correção dos limites dos polígonos temáticos e troca de uma classe temática por outra que tenha sido indevidamente classificada.

4.2.2 Índice de degradação ambiental

Esta etapa tem por objetivo analisar a degradação ambiental do município de Paço do Lumiar (MA), muitos modelos e indicadores estão disponíveis para analisar a magnitude da taxa de tendência das mudanças de degradação ambientais (AL-AWADHI et al., 2005). Para determinar as taxas de conversão reais da degradação da terra, foi utilizada a equação proposta por Velásquez et al. (2003):

$$X = \left[1 - \frac{S_2 - S_1}{S_1} \right]^{1/n} - 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo X a taxa de conversão do processo de degradação ambiental; S_1 área degradada no tempo t_1 (1988); S_2 área degradada no tempo t_2 (2014); n corresponde a diferença em anos entre as duas datas.

4.2.3 Calibração radiométrica

A calibração radiométrica, ou seja, conversão do ND (Número Digital) para valores físicos de radiância, é uma etapa importante quando se utiliza as diferentes bandas espectrais das imagens de satélite, assim como esclarece Ponzoni e Shimakuro (2007):

um valor de ND de uma imagem em uma banda específica, não está então na mesma escala de outro ND de outra imagem em outra banda espectral, isto trás como consequência a impossibilidade de comparação entre NDs de bandas diferentes, mesmo para um mesmo sensor, bem como de sensores diferentes. A caracterização espectral de objetos torna-se assim inviável. (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007, p. 69).

Por este motivo fez-se necessário à conversão do número digital (ND) e para que seja feito a conversão é necessário o conhecimento de algumas características específicas do sensor e das condições ambientais no momento de passagem do satélite.

A calibração radiométrica consiste em um processo em que cada ND é transformado em radiância espectral de cada banda (L_{λ_i}). Para converter os ND de cada pixel em radiância espectral foi utilizado os coeficientes de calibração para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, do satélite Landsat 5 (Tabela 7). Os valores de radiância para cada banda foram obtidos pela equação 2, proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (\text{Eq. 2})$$

onde $L_{\lambda i}$ = radiância espectral de cada banda em Watts ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m1}$); a e b = coeficientes de calibração representando respectivamente as radiâncias espectrais mínima e máxima; ND = intensidade do pixel (valor inteiro entre 0 e 255); i corresponde as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do satélite Landsat 5.

Para a calibração da radiância espectral da imagem OLI/Landsat 8 foram utilizados os dados apresentados na Tabela 8 para as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (USGS, 2014; MACHADO, 2014).

$$L_{\lambda} = M_L \cdot ND + A_L \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: L_{λ} = radiância espectral; M_L = fator multiplicativo; A_L = fator aditivo de conversão específico para cada banda espectral; ND = Número digital.

4.2.4 Refletância espectral

O cálculo da refletância espectral monocromática para cada banda ($\rho_{\lambda i}$), que é a razão entre o fluxo da radiação solar refletida e o fluxo da radiação solar incidente, foi obtido de acordo com a equação 4 (BASTIAANSEN, 1995):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde $L_{\lambda i}$ = radiância espectral de cada banda; $ESUN_{\lambda}$ = irradiância solar espectral no topo da atmosfera, apresentada na Tabela 7; $\cos Z$ = cosseno do ângulo de incidência da radiação solar; d_r = inverso do quadrado da distância relativa entre Terra–Sol.

O inverso do quadrado da distância relativa Terra–Sol (d_r) é obtido pela Equação 5 conforme propõe Iqbal (1983).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(DSA \frac{2\pi}{365} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

onde DSA = dia sequencial do ano.

O $\cos Z$ (cosseno do ângulo de incidência da radiação solar) foi obtido a partir do ângulo de elevação do sol, que esta disponível no ficheiro de metadados de cada imagem.

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

onde: E = é o ângulo de elevação do Sol.

Os valores do $\cos Z$, ângulo de elevação do solar e o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol estão apresentados na tabela 6.

O ESUN da imagem Landsat 8 (Tabela 8) foi obtido a partir da equação 7, conforme o manual Grass GIS (2014) e cujo os parâmetros estão disponíveis no ficheiro de metadados de cada imagem.

$$ESUN_{\lambda} = \frac{\left(\frac{L_{\lambda,i} \cdot \pi \cdot D^2}{\rho_{sup,i}}\right)}{\cos Z} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde D = distância Terra-Sol, $L_{\lambda,i}$ = radiância máxima espectral planetária, de cada banda; $\rho_{sup,i}$ = refletância máxima espectral planetária, de cada banda; $\cos Z$ = cosseno do ângulo de incidência da radiação solar.

A equação 8 foi utilizada para converter valores ND em dados de refletância da imagem Landsat 8, conforme USGS (2015b). Para a conversão utilizou-se os coeficientes disponibilizados no arquivo de metadados da imagem, os respectivos valores estão apresentados na Tabela 8.

$$\rho_{\lambda}' = M_p \cdot ND + A_p \quad (\text{Eq. 8})$$

onde: ρ_{λ}' = refletância espectral no topo da atmosfera, sem correção para o ângulo solar. Note-se que ρ_{λ}' não contém uma correção para o ângulo de sol; M_p = fator multiplicativo de conversão específico para cada banda espectral; A_p = fator aditivo; ND = Número Digital

A reflectância espectral da imagem landsat 8, com um correção para o ângulo solar, foi obtida através da equação 9, conforme orienta o USGS (2015b).

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{se})} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{sz})} \quad (\text{Eq. 9})$$

onde ρ_{λ} = refletância espectral no topo da atmosfera; θ_{se} = ângulo de elevação solar local, equivalente ao valor SUN_ELEVATION (disponibilizado no ficheiro de metadados da imagem); θ_{sz} = ângulo solar zenital local ($\theta_{sz} = 90 - \theta_{se}$).

4.2.5 Albedo no topo da atmosfera

Em seguida ao cômputo da refletância, procedeu-se o cômputo do albedo planetário, também chamado de albedo topo da atmosfera (α_{toa}), sendo este sem qualquer correção atmosférica, isto é, refletâncias espectrais medidas no topo da atmosfera não ajustadas a transmissividade atmosférica, sendo obtido pela Equação 10, proposta por Allen (2002). Os parâmetros W_{λ_i} para calibração da refletância das imagens Landsat 5 estão apresentados na Tabela 7 e para a obtenção dos valores de albedo W_{λ_i} no topo da atmosfera para a imagem OLI/Landsat 8 foi aplicado os parâmetros apresentados na Tabela 8.

$$\alpha_{toa} = \omega_{\lambda_1}\rho_1 + \omega_{\lambda_2}\rho_2 + \omega_{\lambda_3}\rho_3 + \omega_{\lambda_4}\rho_4 + \omega_{\lambda_5}\rho_5 + \omega_{\lambda_7}\rho_7 \quad (\text{Eq. 10})$$

onde: ω_{λ_i} = coeficiente de calibração para cada banda; $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_7$ = refletância planetária de cada banda.

4.2.6 Albedo da superfície

O cômputo do albedo da superfície, também chamado de albedo corrigido para os efeitos atmosféricos, foi obtido através da equação 11, conforme Bastiaanssen (2000). O albedo da superfície é computado pela correção do albedo planetário, e representa a porcentagem de energia eletromagnética que é refletida por uma determinada superfície em função da energia incidente sobre a mesma (PONZONI E SHIMABUKURO, 2007).

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde: α_{toa} = albedo planetário (obtido na equação 10); α_p = porção da radiação solar refletida pela atmosfera para o satélite (varia entre 0,025 a 0,04, tem sido mais comumente utilizado o valor de 0,03); τ_{sw} = transmissividade atmosférica em função da pressão atmosférica e da água precipitável, obtida pela equação 12, conforme ASCE-EWRI (2005), Silva (2014) e Moreira (2014).

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left(\frac{-0,00146 P_a}{K_t \cos Z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

onde P_a = pressão atmosférica (kPa), obtida conforme a equação 13; K_t = coeficiente de turbidez do ar ($K_t = 1,0$ para ar limpo e $K_t = 0,5$ para ar túrbido ou poluído, neste estudo foi utilizado $K_t = 1,0$); $\cos Z$ = ângulo zenital do Sol; W = água precipitável na atmosfera (mm), obtida conforme a equação 14.

A pressão atmosférica foi adquirida através da equação 13, conforme ASCE-EWRI (2005):

$$P_a = 101,3 \left(\frac{T_a - 0,0065z}{T_a} \right)^{5,26} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde: T_a = temperatura do ar em Kelvin; z = altitude da superfície em metros (m), onde foi utilizado o MDE (modelo digital de elevação)

A água precipitável foi obtida através da equação 14.

$$W = 0,14 \cdot e_a P + 2,1 \quad (\text{Eq. 14})$$

sendo e_a = pressão atual de vapor d'água (kPa), calculada com base na umidade relativa do ar (UR%), obtido pela equação 15, conforme descrito por Allen et al. (1998).

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (\text{Eq. 15})$$

no qual e_s = pressão de saturação (kPa) no momento da passagem do satélite, calculada com base na temperatura do ar, obtido pela Equação 16.

$$e_s = 0,61078 \exp \left(\frac{17,2694 T_a}{237,3 + T_a} \right) \quad (\text{Eq. 16})$$

4.2.7 Índices de vegetação

4.2.7.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) é a razão entre a diferença das refletividades da banda do infravermelho próximo e no vermelho, pela soma dessas mesmas refletividades (ROUSE et al., 1974). O IVDN é um indicador da

quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, maior indício de presença de vegetação, e quanto mais próximo de -1, maior indício de presença de solos descobertos e rochas. Nas superfícies com presença de água ou nuvens, esta variação é sempre menor do que 0, o IVDN é obtido pela seguinte equação:

$$IVDN = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (\text{Eq. 17})$$

sendo: ρ_{IV} = a banda espectral no infravermelho próximo, para as imagens Landsat 5 foi utilizado a banda espectral 4 e para a imagem Landsat 8 foi utilizado a banda espectral 5; ρ_V = a banda espectral do vermelho, para as imagens Landsat 5 foi utilizado a banda espectral 3 e para a imagem Landsat 8 foi utilizado a banda espectral 4.

4.2.7.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – IVAS

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) foi obtido através da equação proposta por Huete (1988):

$$IVAS = \frac{(1+L)(\rho_{IV} + \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (\text{Eq. 18})$$

no qual L = uma constante e pode apresentar valores de 0 a 1, variando segundo a própria biomassa característica da área analisada. Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), os valores de L são 1 para baixas densidades de vegetação, 0,5 para médias densidades de vegetação, e 0,25 para altas densidades de vegetação. Em conformidade com os autores supracitados, em geral, a constante $L = 0,5$ é mais comumente utilizado, pois engloba uma maior variação de condições de vegetação e corresponde ao valor ideal para áreas com vegetação de densidade média. Assim neste estudo utilizou-se $L = 0,5$.

4.2.7.3 Índice de Área Foliar – IAF

O uso do parâmetro biofísico IAF é utilizado em modelos climáticos para estimar o fluxo de energia (ASHBY, 1999). Neste estudo foi aplicado o método baseado na relação entre massa e área foliar usando a Eq. 19 (ALLEN, 2002):

$$IAF = -\ln \frac{\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59} \right)}{0,91} \quad (\text{Eq. 19})$$

4.2.9 Emissividade Atmosférica

A emissividade atmosférica (ϵ_a) foi obtida conforme a equação proposta por Bastiaanssen (1995), qual seja:

$$\epsilon_a = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (\text{Eq. 20})$$

sendo τ_{sw} = transmissividade atmosférica (obtida na equação 12)

4.2.8 Emissividade da banda larga e emissividade do termal

A estimativa da temperatura da superfície foi feita através da equação de Planck invertida, proposta para um corpo negro, onde a emissividade é igual a 1. Deve-se considerar que cada pixel não constitui um corpo negro, assim, há necessidade de se estabelecer a emissividade no domínio espectral da banda termal (ϵ_{NB}), banda 6 do Landsat 5/TM (10,4 – 12,5 mm) e na faixa 10 do Landsat 8 (10,60 – 11,19), para fins do cálculo da T_s , bem como no cálculo da radiação de onda longa emitida pela superfície, que nesse caso é considerada a emissividade da banda larga (ϵ_0), obtida pela equação 22. Estes índices (ϵ_{NB} e ϵ_0) são obtidos em função do IAF. A emissividade da banda larga e emissividade do termal foram obtidas conforme Allen (2002).

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \cdot IAF \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (\text{Eq. 22})$$

para pixels com $IAF \geq 3$ são adotados valores de ϵ_0 e $\epsilon_{NB} = 0,98$ e para corpos d'água ($IVAS < 0,1$), $\epsilon_0 = 0,985$ e $\epsilon_{NB} = 0,99$, conforme Allen et al. (2002).

4.2.9 Temperatura da superfície

Para a obtenção da Temperatura da Superfície (T_s) foi utilizado a radiância espectral da banda termal, para o Landsat 5, corresponde a banda 6 e para o Landsat 8 corresponde a banda 10 e a emissividade da banda do termal (ϵ_{NB}). A equação 23 possibilitou o cômputo em graus Kelvin da temperatura de superfície (ALLEN, 2002):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (\text{Eq. 23})$$

onde k_1 e k_2 são constantes específicas de cada banda do termal, nas imagens Landsat 5, $k_1 = 607,76$ e $k_2 = 1260.56 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ de acordo com Allen et al. (2002) e na imagem Landsat 8, $k_1 = 774.89$ e $k_2 = 1321.08 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, disponível no arquivo de metadados da imagem, L_λ = radiância espectral da banda termal (banda 6 do Landsat 5 e banda 10 do landsat8) e ϵ_{NB} = Emissividade do Termal.

Vale ressaltar que os valores da temperatura de superfície foram obtidos inicialmente em graus Kelvin e posteriormente foram transformados para graus Celsius.

4.2.10 Radiação de onda longa emitida

A radiação da onda longa emitida pela superfície é obtida conforme a seguinte equação abaixo:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{Eq. 24})$$

onde σ = constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$); T_s = temperatura da superfície e ϵ_0 = emissividade de cada pixel.

4.2.11 Radiação de onda longa incidente

A radiação de onda longa incidente é computada conforme a seguinte equação:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (\text{Eq. 25})$$

onde ϵ_a = emissividade da atmosfera; T_a = temperatura do ar em graus Kelvin.

4.2.12 Radiação de onda curta incidente

A radiação de onda curta incidente corresponde à radiação solar em cada pixel no momento da passagem do satélite, esses valores são obtidos através da seguinte expressão (ALLEN et al., 2002):

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos Z_d \cdot \tau_{sw} \quad (\text{Eq. 26})$$

onde S = constante solar (1367 Wm^{-2}); τ_{sw} = transmissividade atmosférica.

4.2.13 Saldo de radiação

O saldo de radiação (R_n) foi computado através da seguinte equação, conforme ALLEN et al., 2002.

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (\text{Eq. 27})$$

onde $R_{s\downarrow}$ = radiação de ondas curtas incidente; α_{sup} = albedo de superfície corrigido para cada pixel; $R_{L\downarrow}$ = radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície; $R_{L\uparrow}$ = radiação de onda longa refletida pela superfície; ε_0 = emissividade de cada pixel.

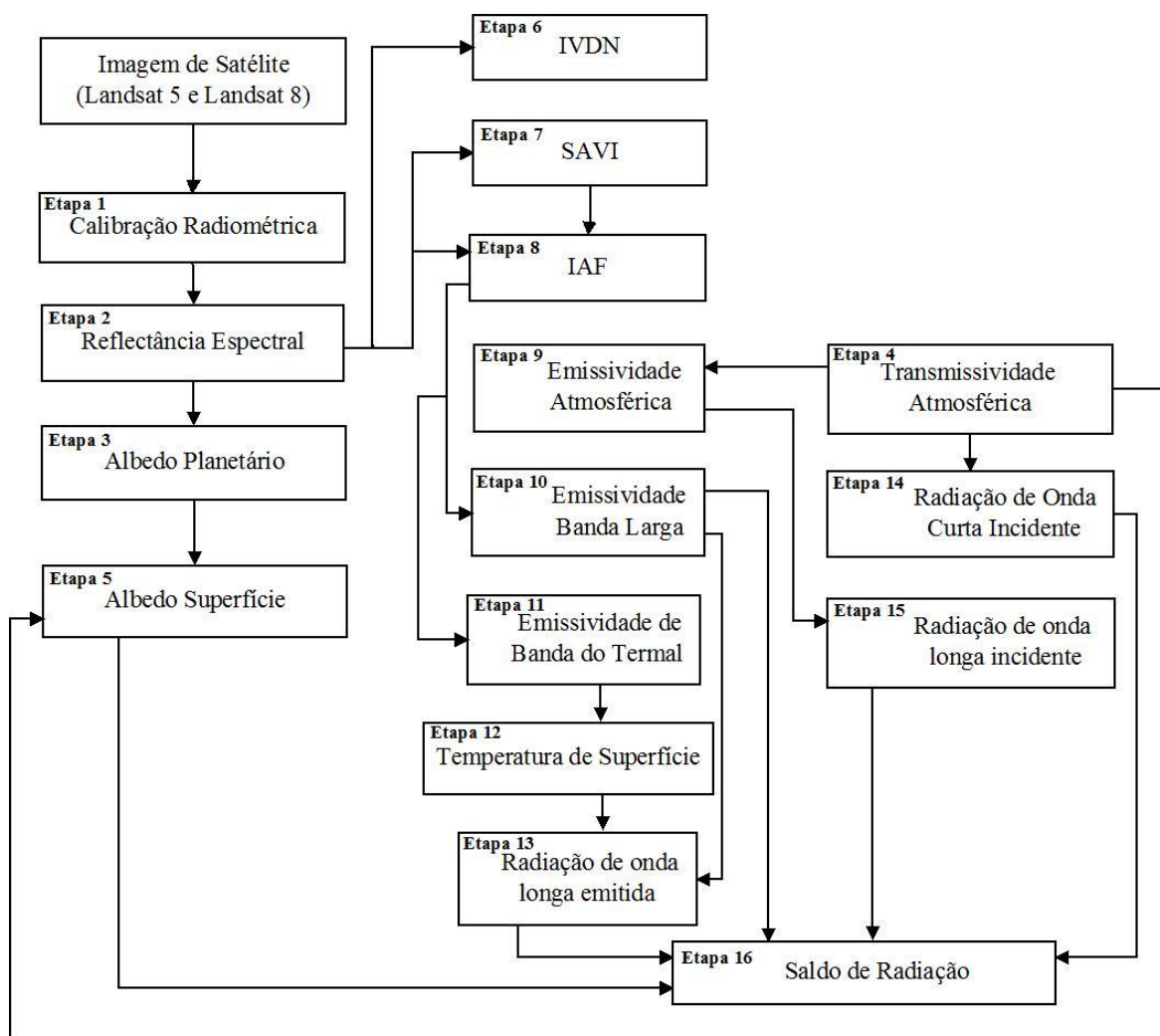


Figura 18 - Fluxograma das etapas computacionais do cálculo do saldo de radiação à superfície.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.14 Análise Estatística

Para o procedimento referente à análise estatística descritiva dos parâmetros biofísicos, utilizou-se a ferramenta *Zonal Statistics as Table* (em *Spatial Analyst Tools > Zonal*) do software ArcGIS 10.1[®], que possibilitou os cálculos estatísticos zonais para as amostras selecionadas.

Para cada data de aquisição das imagens (02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014), foram selecionadas amostras das quatro classes de uso e ocupação da terra: (1) urbano, (2) vegetação arbórea/arbustiva, (3) vegetação arbustiva/herbácea e (4) mangue. A Figura 19 mostra a localização de cada área amostral.

A análise estatística permitiu verificar os valores dos *pixels* referentes a cada parâmetro biofísico (arquivo matricial), dentro de cada classe de uso e ocupação da terra (arquivo vetorial). O *software* ArcGIS® apresenta a estatística descritiva em forma de tabela, contendo as seguintes estatísticas: variação, média e desvio padrão. Em seguida, essa tabela foi exportada para um arquivo no formato “txt”, e posteriormente, os dados fornecidos foram organizados em planilhas no Excel.

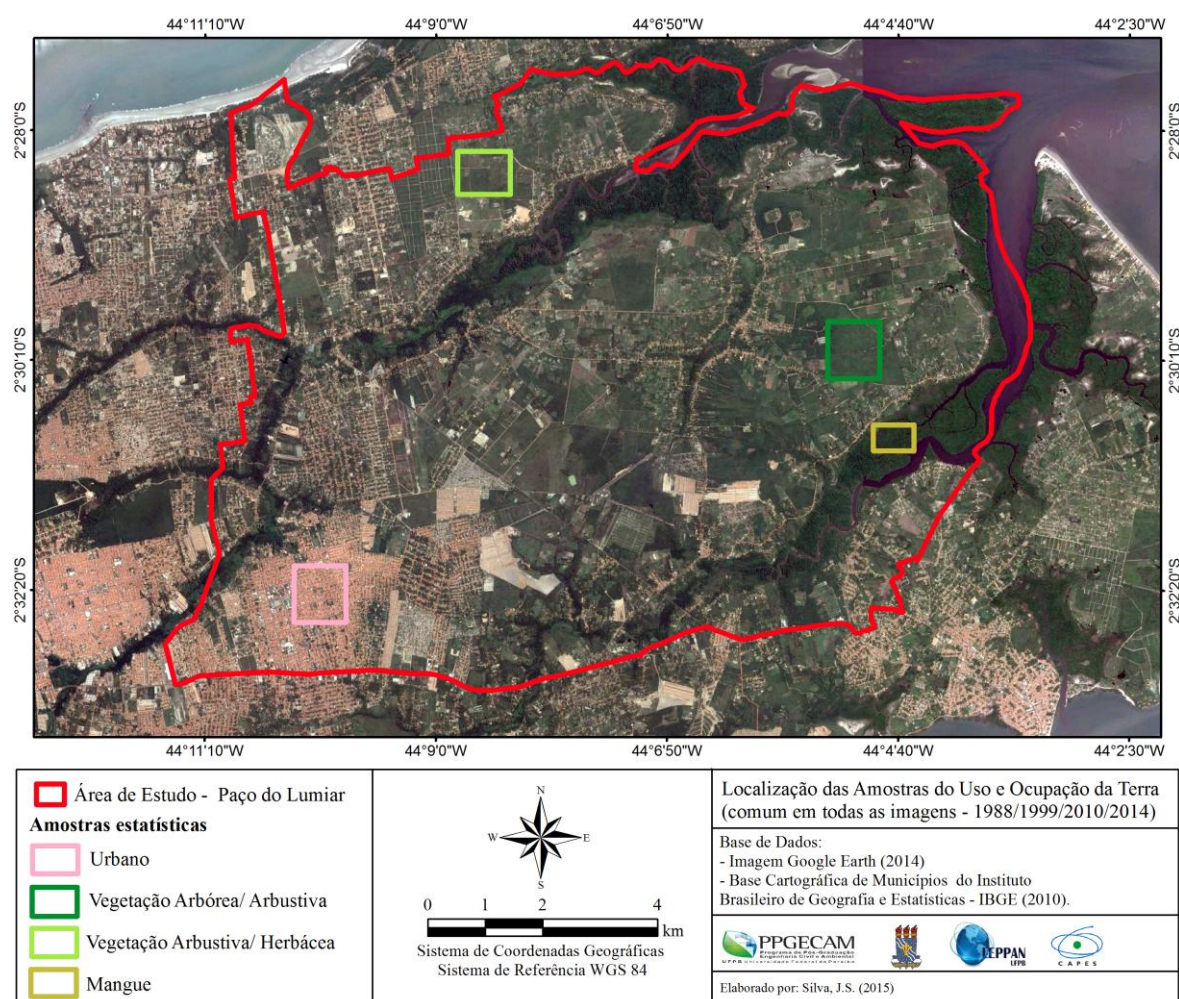


Figura 19 - Localização das áreas amostrais do uso e ocupação da terra.

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.15 Validação da temperatura de superfície

A validação da temperatura de superfície foi elaborada a partir da comparação entre os valores da temperatura observada (T_o), obtidos na estação meteorológica do INMET, e os valores da temperatura da superfície estimada (T_s), mediante processamento

das imagens termais. Neste estudo foram utilizadas duas comparações: (1) considerando o valor da temperatura estimada do pixel de referência, isto é, onde a estação meteorológica está localizada e (2) considerando a média dos nove valores da temperatura estimada dos pixels ao redor da estação. Essa última comparação foi desenvolvida para tentar eliminar a possibilidade do pixel de referência possuir um valor muito diferente dos pixels adjacentes (*spike*) (Sabin et al., 2012)

Existem vários métodos na literatura para correção desses problemas. Sabin et al. (2012) esclarecem que “as abordagens para correção de *spikes* podem variar de acordo com o sentido de observação do conjunto dados”. Neste estudo, a eliminação da possível probabilidade do pixel de referência ser ou não *spike*, ou seja, possuir um valor muito acima dos valores dos pixels adjacentes, tem por objetivo homogeneizar o valor da temperatura estimada próximo à estação meteorológica. O autor considera ainda que, “quando o pixel central apresenta um valor fora do limite de confiança, então ele é substituído pela média dos valores de intensidade de espalhamento dos pixels vizinhos”. Isto contribui para que, seja descartado o valor extremo do pixel de referência e também eliminar a possibilidade dos valores dele, pixel de referência, ter tido interferência dos valores da temperatura de superfície dos pixels adjacentes.

4.2.16 Elaboração dos perfis da temperatura de superfície e análise da correlação temperatura/topografia

Para a elaboração dos perfis da temperatura e análise da correlação entre a temperatura/topografia, foi realizado o recorte da área de estudo. Para esta análise considerou-se apenas a área onde foi identificada a maior alteração do uso e ocupação da terra na zona urbana no município de Paço do Lumiar.

Com o objetivo analisar o comportamento da temperatura de superfície, em escala de detalhe, foram traçados três perfis de temperatura (perfis A–B, C–D e E–F), para as quatro datas analisadas (02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014). Este procedimento foi realizado no software ArcGis 10.1[®], através das ferramentas *Interpolate Line* e *Profile Graph*. Esses três perfis, representam três eixos distintos no que tange a modificação do uso e ocupação da terra na área de estudo.

O perfil A–B, que possui extensão de 3,5 km, foi traçado sobre áreas onde existem presença de cobertura vegetal densa, corpos hídricos e mancha urbana. O perfil

C–D de 3,5 km, traçado em áreas sem cobertura vegetal (áreas de conjuntos habitacionais) e em áreas com presença de pequenos polígonos de cobertura vegetal. O perfil E–F com 5 km de extensão, foi traçado no sentido leste/oeste, na porção sudoeste do município de Paço do Lumiar, acompanhando o sentido de expansão da malha urbana do município.

Os valores de altitude da área de estudo, utilizados na análise da correlação entre a temperatura de superfície e topografia, foram obtidos a partir do SRTM com resolução espacial de 30 m disponibilizado pelo USGS.

Ainda com relação à análise em escala de detalhe, para verificar a modificação do uso e ocupação da terra e a formação de ilhas de calor, foi analisado as alterações da temperatura do bairro Maiobão. Este encontra-se inserido na zona urbana do município de Paço do Lumiar (Figura 20), sendo considerado o bairro mais densamente ocupado da área de estudo e onde houve intensa modificação do uso e ocupação da terra, considerando a última década (MASULLO, 2012).

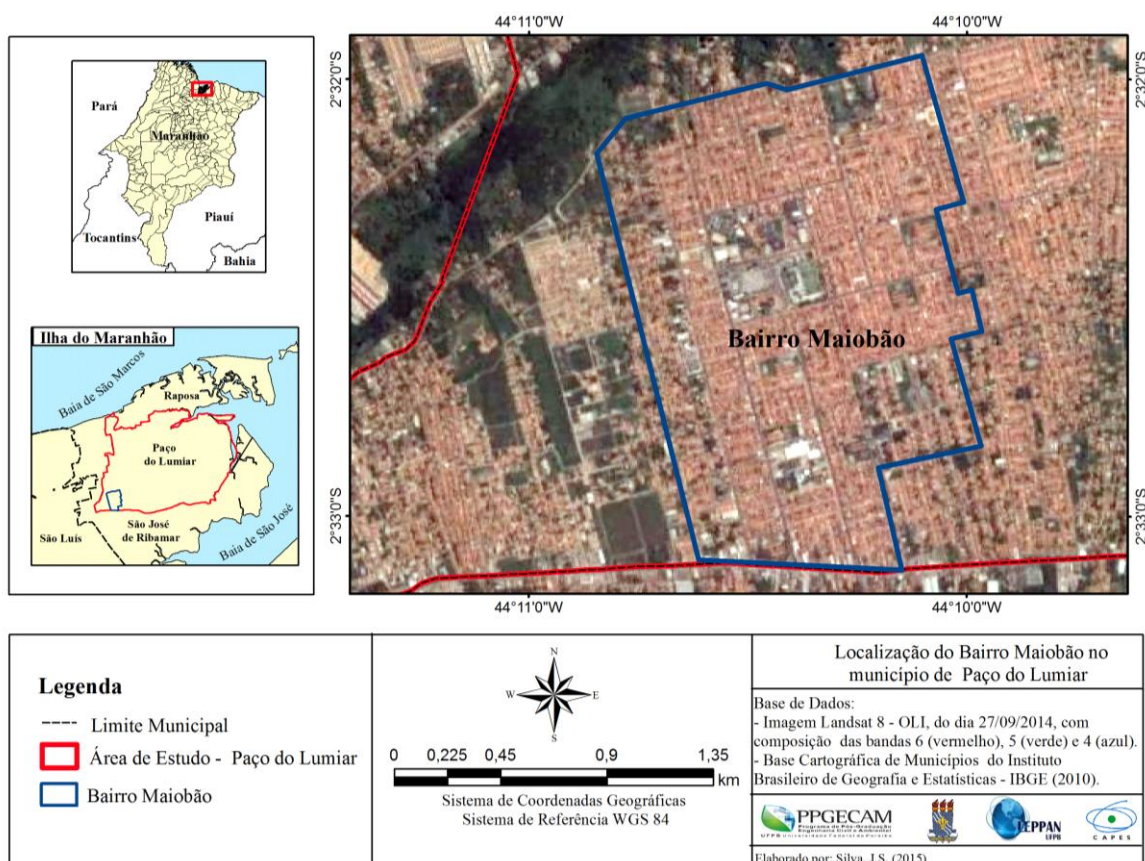


Figura 20 - Localização do Bairro Maiobão no município de Paço do Lumiar.

Fonte: Elaborado pela autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Condições Climáticas no momento de passagem do satélite

A Figura 21 apresenta as totais de precipitados referente aos 5 dias que antecederam a data de passagem do satélite para as cinco imagens analisadas neste estudo. Ressalta-se que a análise da precipitação total ocorrida anterior ao momento de passagem do satélite são fundamentais para compreender as estimativas dos parâmetros biofísicos.

De acordo com Trentin (2011), as mudanças na fenologia da vegetação estão relacionadas com as variáveis do meio físico, como o clima; ou seja, os padrões fenomenológicos podem ser influenciados por fatores climáticos como pluviosidade e temperatura, que influenciam na estimativa dos índices de vegetação, albedo, temperatura de superfície e saldo de radiação.

Canavesi et al. (2005) analisaram índices de vegetação, correlacionando com dados de precipitação, e observaram que a vegetação natural respondeu significativamente no início e fim dos períodos mais chuvosos, mostrando assim que a pluviometria interfere na estimativa dos parâmetros biofísicos.

Batista et al. (1993) analisaram a mudança de diferentes tipos de vegetação associada ao período de maior e menor índice de precipitação, e constaram que as estações mais secas apresentaram valores mais marcantes de alterações da vegetação, representado pela queda nos valores de IVDN.

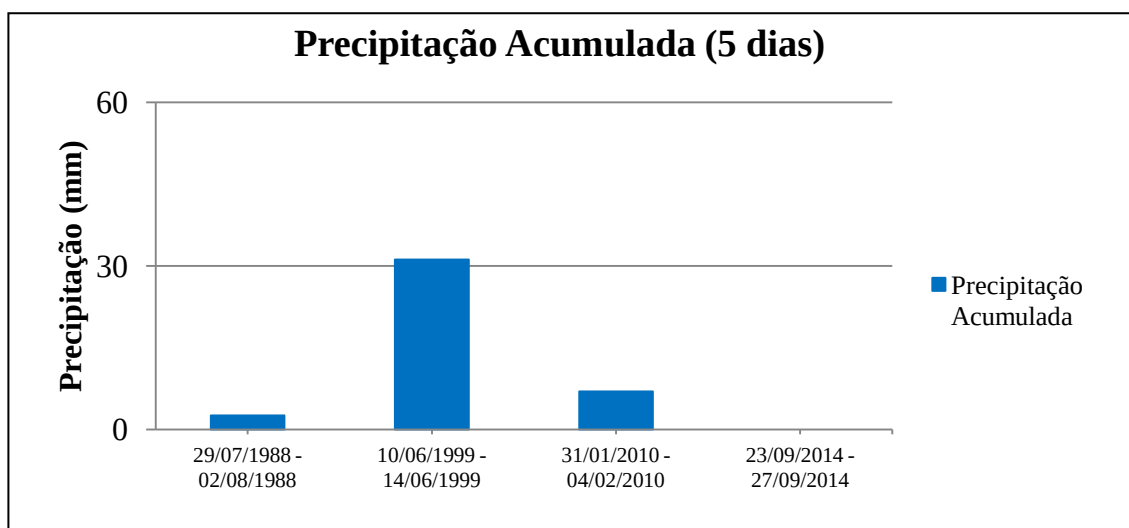


Figura 21 - Precipitação no município de Paço do Lumiar referente aos 5 dias antes do imageamento do satélite para cada data.

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que para as imagens dos dias 02/08/1988, 14/06/1999 e 04/02/2010 tiveram acumulado pluviométrico anterior a data de passagem do satélite, e apenas na imagem do dia 27/9/2014 não foram registrados dados de chuva nos 5 dias anteriores à obtenção da imagem. A imagem do dia 02/08/1988 apresentou um total acumulado 2,6 mm, nos 5 dias que antecederam a obtenção da imagem, na imagem do dia 14/06/1999 o total precipitado foi de 31,2 mm e a imagem do dia 04/02/2010 o acumulado foi de 7 mm.

5.2 Evolução do uso e ocupação da terra no município de Paço do Lumiar

Nas datas analisadas, que compreendeu as datas de (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014, observou-se grandes alterações no uso e ocupação das terras no município de Paço do Lumiar. Esse fato pode ser constatado pelos dados apresentados na Tabela 9, que demonstram o percentual de cobertura do uso e ocupação da terra no município para cada classe mapeada.

Os dados apresentados na Tabela 9 revelam que, houve significativa redução da classe vegetação arbórea/arbustiva, pois em 1988 totalizava 37,53% da área total do município, e no ano de 2014 ocupava uma área de 23,85%. A maior redução da classe de vegetação arbórea/arbustiva ocorreu entre os anos 1988 e 1999, com redução de 13,44% da área.

Em contrapartida, a classe urbano teve o maior crescimento no período estudado. Em 1988 essa classe ocupava apenas 8,85%, em 1999 13,15%, em 2010, a área ocupada era de 13,27% e em 2014 de 18,38%, demonstrando um crescimento gradativo para a classe urbano. Em 2014 a área ocupada pela classe urbano mais que dobrou comparado à 1988. A variação foi de 11,63 km² entre estes dois anos (1988 - 2014).

Tabela 9 - Quantificação das classes de uso e ocupação da terra no município de Paço do Lumiar em km² e percentual.

Usos da terra	Área							
	1988		1999		2010		2014	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Urbano	10,84	8,85	16,13	13,15	16,27	13,27	22,47	18,38
Vegetação Arbórea/Arbustiva	45,95	37,53	32,51	26,50	29,65	24,19	29,16	23,85
Vegetação Arbustiva/Herbácea	48,96	39,99	59,52	48,51	61,44	50,13	58,9	48,17
Mangue	12,88	10,52	10,43	8,50	11,17	9,11	8,45	6,91
Água	3,8	3,10	4,11	3,35	4,04	3,30	3,29	2,69
Total	122	100	122	100	122	100	122	100

Na classificação das imagens dos dias 02/08/1988 e 03/06/1999, observou-se que a classe de mangue teve redução de 2,45 km² de sua área, o que representa uma variação de 19,02% entre as duas datas. Entre 1999 e 2010, ocorreu um crescimento de 5,74%, que corresponde a variação de 0,74 km². A maior redução da área de mangue ocorreu entre os anos de 2010 e 2014, com redução de 21,11% , que corresponde a 2,72 km² (Figura 22).

A quantificação da classe de água mostrou que a maior variação foi entre as datas de 2010 e 2014. Os dados mostram que ocorreu um decréscimo de 21,11% nesse período. Esta característica pode estar relacionada com os períodos do ano onde há variação dos índices pluviométricos. Salienta-se que a imagem de 2010 é referente à época do ano com maior ocorrência de chuvas na região.

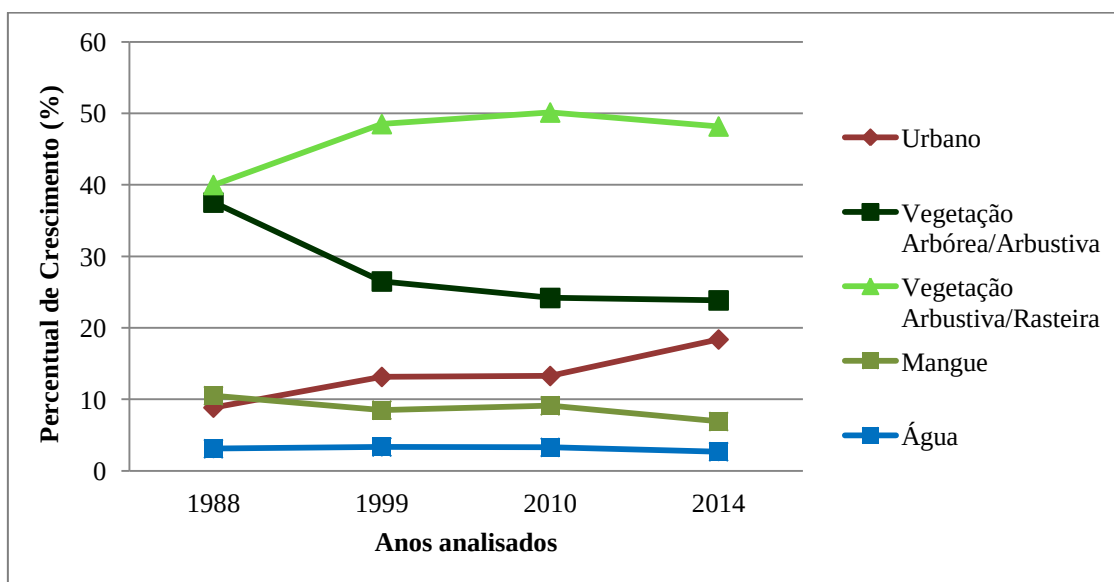


Figura 22 - Alteração do uso e ocupação da terra entre os anos de 1988 a 2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

A classificação do uso e ocupação da terra mostra que na imagem de 1988 (Figura 23a) a área com presença de vegetação arbustiva/herbácea, ocupava 48,96 km² e na cena de 1999 (Figura 23b), ocupava 59,52 km². Esses resultados revelam que entre 1988 e 1999, houve um crescimento de 10,56 km² da área com vegetação arbustiva/herbácea. Entre 1999 e 2010 houve um crescimento de 1,92 km², que corresponde a variação de 3,92% nesse período. Entre 2010 e 2014 houve redução de 5,18% da área com presença de vegetação arbustiva/herbácea (2,54 km²).

A partir dos dados obtidos pela classificação do uso e ocupação da terra, constata-se que em 1988 o município de Paço do Lumiar apresentou maior quantidade de áreas verdes que no ano de 2014, quando grande parcela da vegetação passou a ser substituída, dando espaço a áreas antropizadas.

Observa-se na Figura 23a–d que a malha urbana do município de Paço do Lumiar está em processo de expansão. Este fato é evidenciado com a presença de áreas construídas em regiões onde antes eram ocupadas pela vegetação nativa.

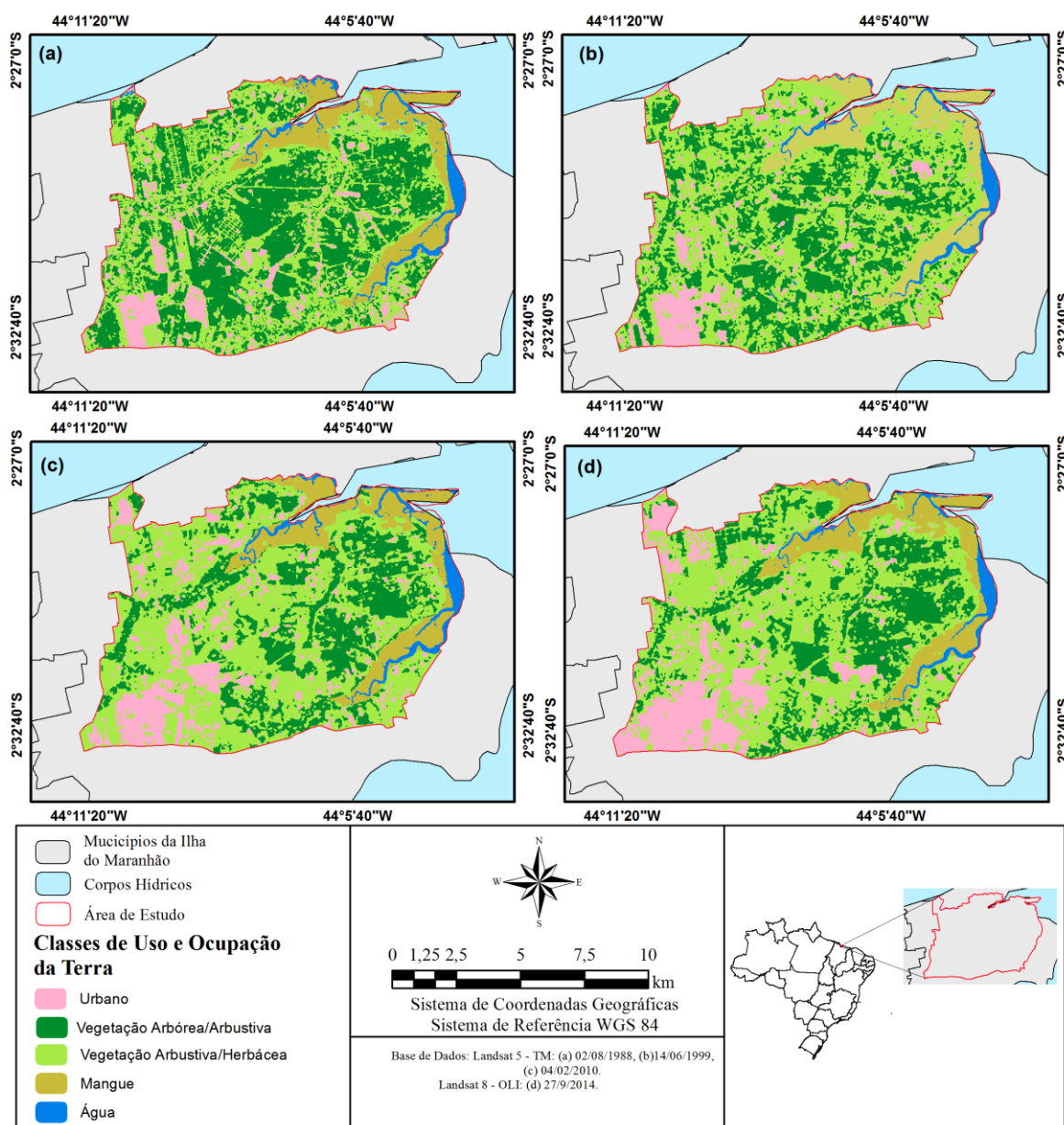


Figura 23 - Mapa da classificação do uso e ocupação da terra do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.1 Degradação ambiental da área de estudo entre os anos de 1988 e 2014

Para a análise da degradação ambiental, este estudo utilizou os dados da classificação do uso e ocupação da terra do município de Paço do Lumiar. Foram utilizados os dados da classificação da terra referente as datas de 02/08/1988 e 27/09/2014.

A Figura 24 apresenta as taxas de degradação ambiental, ocorridas no município de Paço do Lumiar, entre 1988 e 2014. Nesta figura, os valores negativos representam as áreas que diminuíram em extensão, e os positivos, os usos da terra que se expandiram.

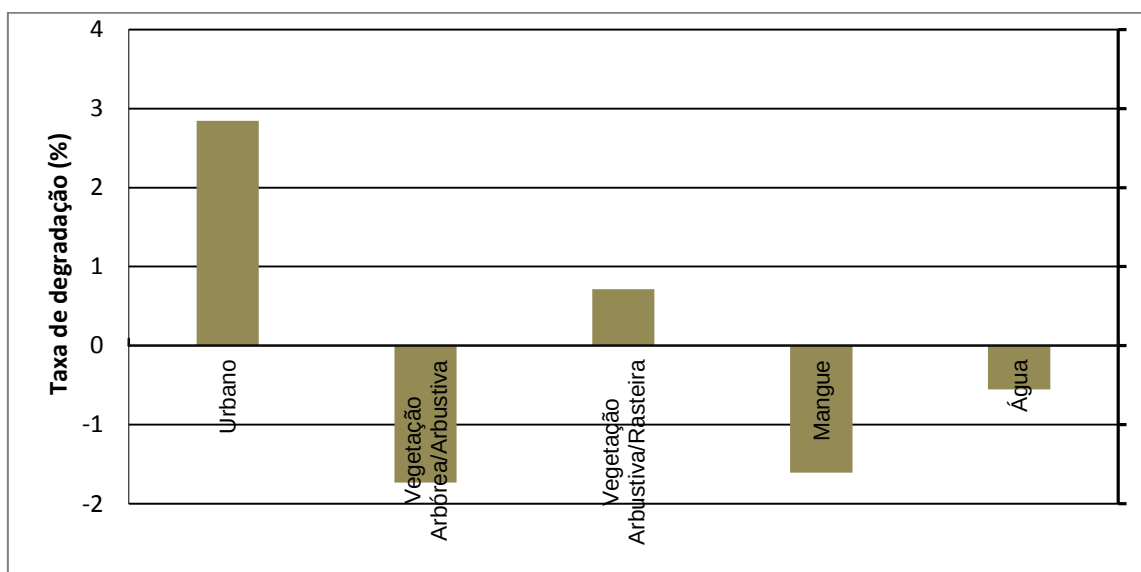


Figura 24 - Taxas do processo de degradação ambiental no município de Paço do Lumiar entre os anos de 1988 e 2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

As taxas da degradação que ocorreu no município de Paço do Lumiar podem ser caracterizadas em três vertentes: (1) a área da zona urbana atingiu degradação de 2,84%, maior degradação entre todas as classes, (2) a segunda maior taxa de degradação foi de -1,73% na área com presença de vegetação arbórea/arbustiva e (3) terceira maior taxa de degradação foi de -1,60% na classe de manguezal.

As alterações das condições naturais que geraram a degradação ambiental são atribuídas a diversos fatores. Dentre os principais fatores, estão os conflitos de interesse humano, gerado pelo crescimento populacional, especulação imobiliária, que são consideradas um dos principais fatores que contribuem atualmente para a degradação dos recursos naturais nessa área, além da má gestão no planejamento do uso da terra, por parte dos órgãos gestores competente. Todos esses fatores contribuíram para o aumento da degradação no município de Paço do Lumiar entre os anos de 1988 e 2014.

As taxas do processo de degradação ambiental revelaram que, a área de manguezal houve moderada degradação ambiental. Vale salientar que, uma das causas da degradação na área de manguezal foi resultado da retirada da madeira do mangue para o fornecimento de lenha e carvão.



Figura 25 - Área com presença de degradação na cobertura vegetal.

Fonte: Acervo pessoal, 2016.

5.3 Análise dos parâmetros biofísicos do município de Paço do Lumiar

5.3.1 Albedo da superfície

A Tabela 10 apresenta a análise estatística do albedo para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014, referente à área amostral apresentada na Figura 20. Os dados apresentados possibilitam a análise do albedo nas amostras das classes de uso e ocupação da terra.

A estatística descritiva do albedo mostra que a imagem do dia 14/06/1999 apresentou a menor média dos valores de albedo, quando comparada com as datas 02/08/1988, 04/02/2010 e 27/09/2014. Isto está relacionado, com as características climáticas no momento de passagem do satélite. Como pode ser observado na Figura 21, a imagem de 14/06/1999, apresentou o maior precipitação nos cinco dias que antecederam a passagem do satélite.

Na imagem do dia 27/09/2014, o albedo estimado para os diferentes tipos de uso e ocupação da terra apresentou as maiores médias. Em todas as classes do uso e ocupação da terra para essa data são observadas as médias mais elevadas em relação às demais datas. Isto pode ser justificado pelo fato de que essa imagem é do período que as chuvas são mais escassas. Estes valores estão de acordo com os encontrados por Silva et al. (2008), que observaram que os meses com as maiores precipitações obtiveram menores

valores de albedo, enquanto que, nos meses mais quentes, os valores do albedo foram mais elevados.

Foram detectados coeficientes de variação do albedo entre 0,02 e 0,10, que seguem o padrão esperado. O desvio padrão, que mostra quanto os valores estimados estão dispersos dos valores médios (LUNET et al., 2006), são da ordem de 0,003 a 0,02, portanto, este valor é considerado baixo, embora a área analisada na estatística descritiva possua superfícies com características variadas.

Tabela 10 - Albedo estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas.

Anos	Estatísticas	Urbano	Vegetação Arbórea/ Arbustiva	Vegetação Arbustiva/ Herbácea	Mangue
1988	Coeficiente de Variação	0,06	0,02	0,05	0,03
	Média	0,22	0,14	0,12	0,10
	Desvio Padrão	0,01	0,003	0,02	0,004
1999	Coeficiente de Variação	0,10	0,03	0,08	0,02
	Média	0,18	0,12	0,13	0,10
	Desvio Padrão	0,02	0,004	0,01	0,003
2010	Coeficiente de Variação	0,06	0,02	0,06	0,04
	Média	0,24	0,17	0,19	0,14
	Desvio Padrão	0,01	0,003	0,01	0,005
2014	Coeficiente de Variação	0,10	0,03	0,07	0,05
	Média	0,31	0,19	0,25	0,16
	Desvio Padrão	0,02	0,004	0,02	0,01

As Figuras 26a–d mostram os valores da espacialização do albedo para as datas analisadas. Os valores do albedo variaram entre 0,06–1,02. Os menores valores do albedo (0,06–0,15) foram encontrados em áreas com presença de água e com cobertura vegetal mais densa (vegetação arbustiva).

Os valores intermediários (0,15–0,25) foram obtidos em áreas com cobertura vegetal menos densa (vegetação herbácea), enquanto que os maiores valores do albedo (0,25–1,02), como esperado, foram obtidos na área mais densamente urbanizada e sem cobertura vegetal.

A Figura 26a, do dia 02/08/1988, apresenta predominância dos pixels com valores no intervalo de 0,06–0,15. Conforme o mapa de uso e ocupação da terra para esta data (Figura 23a), essa região apresenta a maior densidade de vegetação da classe

arbustiva, esse tipo de vegetação possui a característica de ter alta absorção de radiação e baixa refletividade, consequentemente, menor valor do albedo.

As Figuras 26b–d mostram que houve aumento gradativo da área com os valores máximos de albedo, sendo percebido principalmente na cena do dia 27/09/2014 (Figura 26d). Conforme Gamarra (2014), o aumento dos valores do albedo é provocado pela alta refletividade das construções da zona urbana e o aumento dos valores estão relacionadas com as mudanças do uso e ocupação da terra.

Os valores do albedo obtidos neste estudo corroboram com os de Andrade et al. (2014), que encontraram valores mínimos do albedo (0,05–0,09) para áreas com presença de água, valores intermediários do albedo (0,09–0,16) em áreas com superfície vegetada e em regiões com alta densidade de construções e em solo exposto máximos do albedo (0,21–0,33).

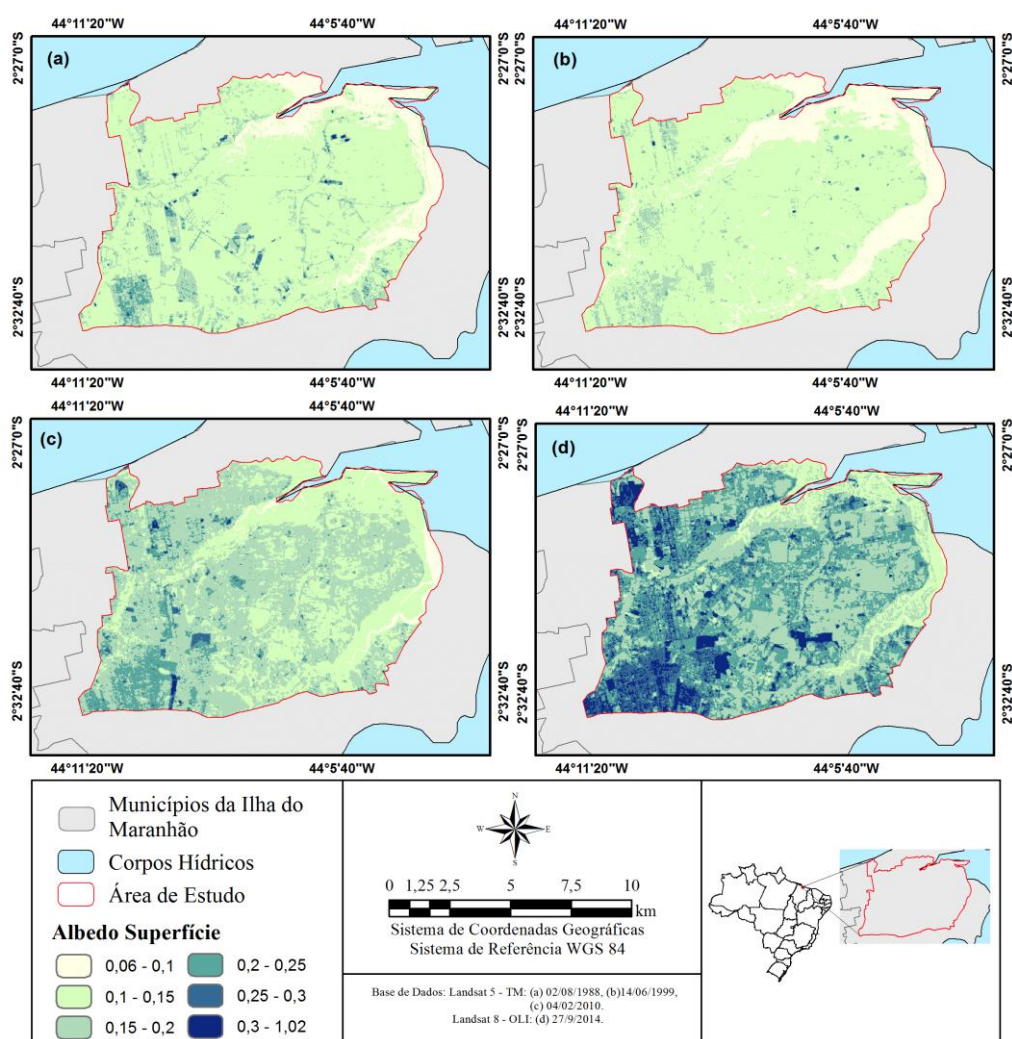


Figura 26 - Mapa de albedo a superfície do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN

A Tabela 11 apresenta os dados da análise estatística do IVDN para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014, referente à área amostral apresentada na Figura 20. Os dados apresentados mostram a relação entre os valores do IVDN e as amostras das classes de uso e ocupação da terra.

A imagem do dia 14/06/1999 apresentou o maior valor médio (0,77), observado na classe de vegetação arbórea/arbustiva; isto mostra que, nessa data, a área selecionada obteve o maior índice de vegetação comparada com as demais datas (02/08/1988, 04/02/2010 e 27/09/2014).

Com relação ao coeficiente de variação do IVDN, em todas as datas analisadas, os maiores valores foram observados nas classes: urbano e vegetação arbustiva/herbácea. Essa variação pode ser atribuída à mistura dos diferentes alvos presentes na área selecionada para a análise estatística.

O resultado do desvio padrão do IVDN apresentou valores baixos, variando entre 0,01 e 0,07. O desvio padrão com os valores mais elevados foram observados em todas as datas analisadas na classe de vegetação arbustiva/herbácea.

Tabela 11 - IVDN estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas

Anos	Estatísticas	Urbano	Vegetação Arbórea/ Arbustiva	Vegetação Arbustiva/ Herbácea	Mangue
1988	Coeficiente de Variação	0,22	0,06	0,18	0,10
	Média	0,36	0,75	0,68	0,73
	Desvio Padrão	0,04	0,01	0,05	0,02
1999	Coeficiente de Variação	0,20	0,08	0,24	0,12
	Média	0,41	0,77	0,65	0,76
	Desvio Padrão	0,05	0,01	0,04	0,02
2010	Coeficiente de Variação	0,15	0,07	0,22	0,15
	Média	0,17	0,61	0,45	0,64
	Desvio Padrão	0,03	0,01	0,05	0,02
2014	Coeficiente de Variação	0,27	0,08	0,21	0,12
	Média	0,21	0,71	0,52	0,70
	Desvio Padrão	0,05	0,02	0,07	0,02

As Figuras 27a–d mostram a espacialização dos valores do IVDN para as datas analisadas no município de Paço do Lumiar. Os valores da estimativa do IVDN variaram de -0,03 a 0,08. Nas Figuras 27a–d, os valores negativos (-0,3–0) representam os corpos

hídricos. Nessas imagens, não foi observado variação significativa para a área ocupada por essa classe.

A classe do IVDN com tonalidade verde escuro representa as regiões onde existe a presença de vegetação densa, ou seja, vegetação arbórea/arbustiva, correspondendo aos locais onde o IVDN apresentou os maiores índices, variando entre 0,7–0,8.

A Figura 27(a) mostra o IVDN referente a cena de 02/08/1988 e demonstra que a classe do IVDN com valores entre 0,7-0,8 prevalece em relação às demais; esses altos valores do IVDN caracterizam maior área com alta densidade de cobertura vegetal existente no local.

Os valores do IVDN das classes 0,4-0,5 e 0,5-0,7, que representam os valores intermediários do IVDN, ocorreram sobre áreas com presença de vegetação arbustiva/herbácea. Na cena de 04/02/2010, se observa que houve maior representatividade da área ocupada por esses valores (0,4-0,5 e 0,5 e 0,7), mostrando diminuição gradativa da área ocupada por vegetação mais densa.

As Figuras 27(b-c) revelam que para as datas de 14/06/1999 e 04/02/2010, na porção sudoeste da área de estudo, houve crescimento da área ocupada pelos valores mais baixos do IVDN. Isso mostra que tem sido intensificado o processo de crescimento e expansão urbana, levando a valores inferiores a 0,4 do IVDN.

A Figura 27(d) apresenta a espacialização do IVDN para a cena de 27/09/2014. Nessa imagem constata-se uma diminuição acentuada da área que contém valores de 0,4, quando comparada a cenas anteriores. Deve-se considerar que a cena de 2014 apresenta elevada quantidade de áreas construídas, com grande redução da cobertura vegetal.

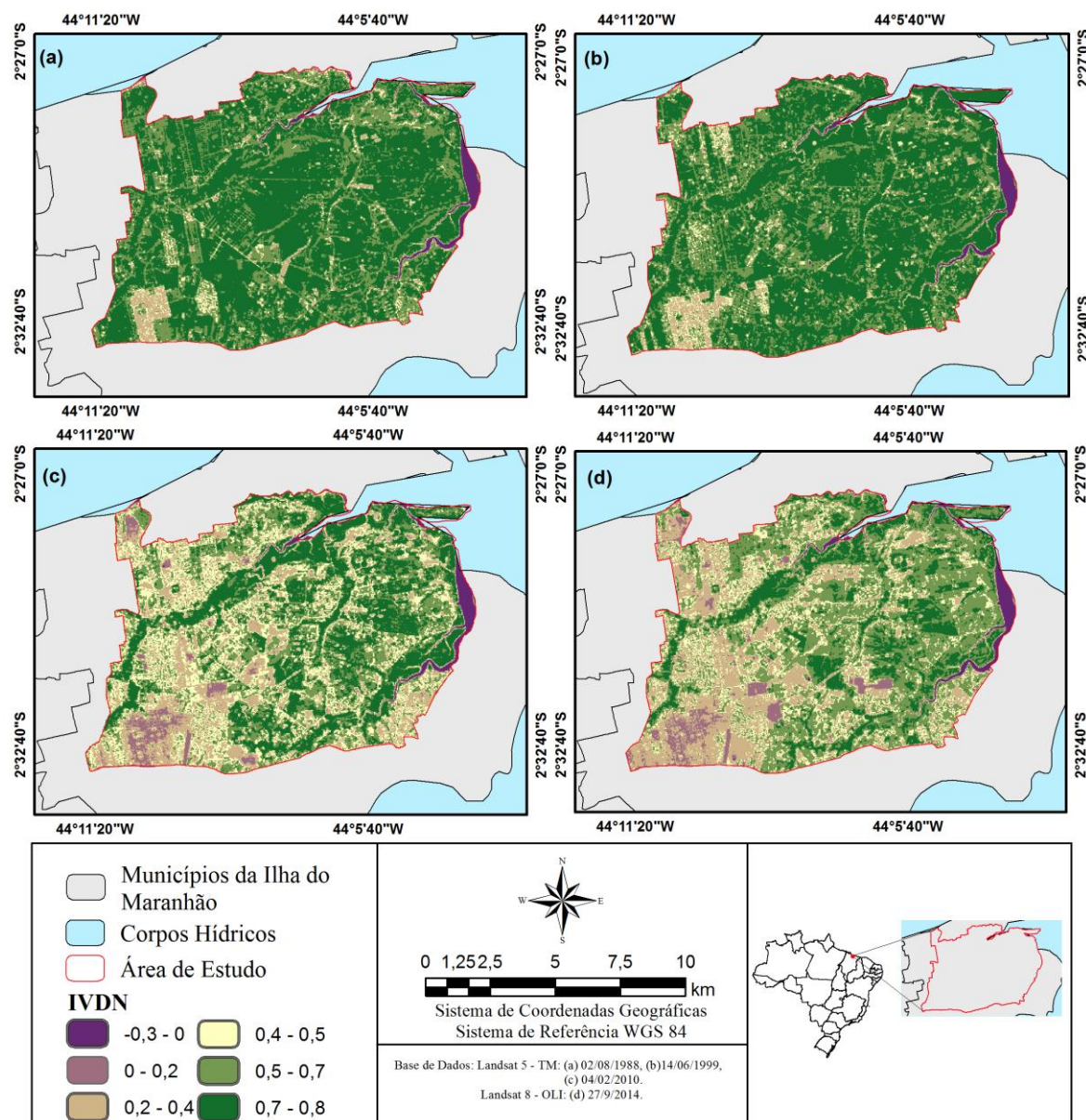


Figura 27 - Mapa do IVDN do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores do IVDN são coerentes com os valores obtidos na estimativa do albedo, deve-se considerar que, nas cenas analisadas, houve crescimento da área ocupada pelos maiores valores do albedo e o aumento do albedo pode ter ocorrido em função da retirada da cobertura vegetal. Vale salientar que os maiores valores do albedo ocorrem geralmente em superfícies antropizadas e de coloração clara, que são características de áreas urbanas. Considerando que, na área de estudo, houve aumento da área sem cobertura vegetal, como mostrado na Figura 27, consequentemente, houve aumento da área ocupada pelos maiores valores do albedo.

Os valores obtidos no IVDN de Paço do Lumiar se aproximam aos obtidos por Honorato e Andrade (2012) no estudo desenvolvido na área urbana da cidade de Aquidauana-MS. As autoras encontram valores mais baixos do IVDN em áreas urbanizadas, mostrando que, o adensamento das construções promoveu uma redução da cobertura vegetal e, conseqüentemente, o aumento da área com os valores mínimos do IVDN.

A Figura 28(a) apresenta uma área com maior presença de cobertura vegetal, ou seja, com vegetação arbórea/arbustiva, o que corresponde à classe de valores mais altos do IVDN, e a Figura 28(b) mostra uma área com presença de vegetação herbácea, correspondendo à classe com valores intermediários do IVDN.



Figura 28 - (a) Área com presença de cobertura vegetal de maior densidade (vegetação arbórea/arbustiva); (b) Área com presença de vegetação herbácea.

Fonte: Acervo pessoal, 2016.

5.3.3 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – IVAS

A Tabela 12 mostra a análise estatística do IVAS para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014, referente à área amostral apresentada na Figura 20. Observa-se para todas as imagens que a maior média do IVDN foi encontrada na classe de vegetação arbórea/arbustiva, e os menores valores médios foram encontrados na classe urbana.

Na classe urbano, a maior variação do IVAS foi para a imagem do dia 27/09/2014, com valor de 0,25, na amostra da imagem de 27/09/2014. Na classe vegetação arbórea/arbustiva, o maior coeficiente de variação foi 0,13. Na classe de vegetação arbustiva/herbácea, a maior variação foi de 0,20, na amostra do dia 27/09/2014. Na classe de mangue, o maior coeficiente de variação foi de 0,16 na amostra do dia 04/02/2010. Esses valores podem ser considerados baixos e mostram que a amostra apresenta certa homogeneidade.

Como esperado, a menor média dos valores do IVAS é observada na classe urbano e a maior média, na classe de vegetação arbórea/arbustiva.

Tabela 12 - IVAS estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas

Anos	Estatísticas	Urbano	Vegetação Arbórea/ Arbustiva	Vegetação Arbustiva/ Herbácea	Mangue
1988	Coeficiente de Variação	0,19	0,07	0,16	0,12
	Média	0,31	0,63	0,54	0,58
	Desvio Padrão	0,03	0,01	0,04	0,02
1999	Coeficiente de Variação	0,17	0,13	0,08	0,13
	Média	0,34	0,61	0,64	0,52
	Desvio Padrão	0,04	0,02	0,01	0,05
2010	Coeficiente de Variação	0,14	0,07	0,18	0,16
	Média	0,15	0,52	0,38	0,53
	Desvio Padrão	0,03	0,01	0,04	0,03
2014	Coeficiente de Variação	0,25	0,08	0,20	0,15
	Média	0,19	0,63	0,48	0,61
	Desvio Padrão	0,05	0,02	0,06	0,03

As classes do IVAS foram estimadas com intervalos que variaram entre -0,2 e 0,7, e ao comparar os índices obtidos no IVDN e do IVAS, observou-se que os dois índices apresentaram valores semelhantes, entretanto, o IVAS apresentou maior variação na separação entre as classes. Este aspecto está relacionado com o fator de ajuste ao solo, conforme proposto por Huete (1988), que utiliza na sua formulação um fator que tenta minimizar os efeitos do *background*.

Os menores valores do IVAS obtidos nesse estudo variaram entre -0,2 e 0, e representam os usos da terra com presença de água. Este índice não teve variação significativa para as datas analisadas, mantendo-se constante em todas as cenas.

A classe com valores máximos do IVAS (0,6–0,7) ocorrem nas áreas com presença de vegetação mais densa. A cena do dia 02/08/1988 (Figura 29a) mostra que esta foi a que ocupou a maior área em comparação com os demais usos da terra.

Nas cenas dos dias 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014 (Figura 29b-d), observa-se que houve decréscimo da quantidade de pixels com valores máximos do IVAS. Nota-se, principalmente, na cena do dia 17/09/2014 (Figura 29d), que a classe com os maiores valores do IVAS apresenta-se fragmentada na área de estudo e com maior representação na porção leste do município.

Observa-se ainda que, na região nordeste do município ocorre maior diferença da representação dos valores dos *pixels* (Figuras 29a–d). Nessa porção da área de estudo, nota-se que na cena do dia 02/08/1988 houve um aumento da classe com valores do IVAS entre 0,5 e 0,6, e na cena do dia 14/06/1999 percebe-se que esta região teve um aumento nos valores máximos entre 0,6 e 0,7.

Nas Figuras 29a–d, os valores entre 0 e 0,3 correspondem ao uso urbano, onde observou-se que, assim como no IVDN, a área desta classe teve representatividade crescente para as datas analisadas, mostrando a expansão da malha urbana do município de Paço do Lumiar. A menor quantidade dos *pixels* para esta classe foi encontrada na cena do dia 02/08/1988 (Figura 29a), e a maior quantidade dos valores desta classe (0–0,3) foram obtidas na cena do dia 27/09/2014 (Figura 29d).

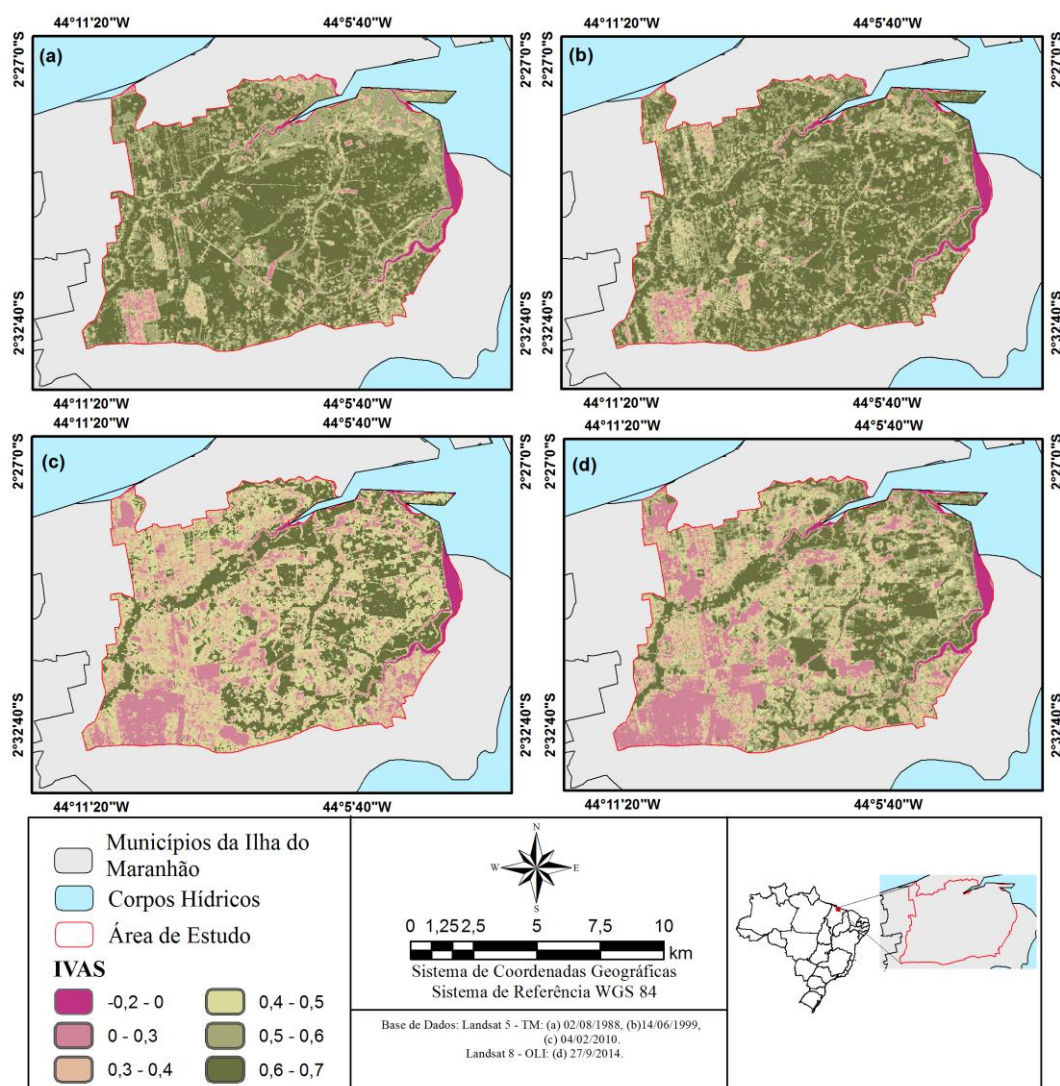


Figura 29 - Mapa do IVAS do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a)02/08/1988, (b)14/06/1999, (c)04/02/2010 e (d)27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.4 Índice de Área Foliar – IAF

A Tabela 13 apresenta o IAF estimado para os diferentes usos e coberturas do solo para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014 referente à área amostral apresentada na Figura 20. As amostras das classes de vegetação arbórea/arbustiva e mangue, como esperado, foram as que apresentaram as maiores média do IAF, o que mostra uma maior densidade da cobertura vegetal nessa classe. A classe urbano apresentou os menores valores do IAF, o que foi observado nas quatro cenas analisadas.

A Tabela 13 mostra a estatística descritiva das classes de uso da terra analisadas neste estudo. Diante desses resultados, os valores do IAF do dia 27/09/2014 apresentaram o maior desvio padrão (0,11–0,34), mesmo assim esses valores são considerados baixos.

Os maiores valores do coeficiente de variação foram observados na amostra do IAF referente às classes de vegetação arbórea/arbustiva e mangue, sobretudo, em 1999 e 2014. Essa variação do IAF pode ser explicada pelo fato da área não ser homogênea e apresentar diferentes características em cada ponto amostral, ou seja, a área analisada apresenta maior mistura das classes de uso e ocupação da terra.

Tabela 13 - IAF estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas

Anos	Estatísticas	Urbano	Vegetação Arbórea/ Arbustiva	Vegetação Arbustiva/ Herbácea	Mangue
1988	Coeficiente de Variação	0,55	1,30	1,20	1,10
	Média	0,49	2,54	1,53	1,87
	Desvio Padrão	0,10	0,24	0,28	0,23
1999	Coeficiente de Variação	0,58	1,69	1,66	1,68
	Média	0,59	2,71	1,44	2,19
	Desvio Padrão	0,13	0,31	0,30	0,25
2010	Coeficiente de Variação	0,26	0,44	0,67	1,00
	Média	0,10	1,38	0,73	1,45
	Desvio Padrão	0,05	0,08	0,16	0,17
2014	Coeficiente de Variação	0,62	1,51	1,12	1,80
	Média	0,20	2,58	1,18	2,23
	Desvio Padrão	0,11	0,32	0,34	0,33

As Figuras 30a–d apresentam a espacialização referente à estimativa do IAF para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014. Esses resultados revelam que os valores do IAF variaram entre 0 e 6, onde os valores próximos a zero representam

as áreas onde não existe presença de cobertura vegetal, e os valores mais elevados são as áreas onde existe maior vigor da vegetação.

A Figura 30a mostra que, no ano de 1988, a maior área do município de Paço do Lumiar apresentava valores mais elevados do IAF. A partir desse índice verificou-se a maior concentração de pixels entre os valores positivos, principalmente entre as classes 2–2,5 e 2,5–6.

Na imagem de 1999 (Figura 30b), nota-se que houve maior ocorrência do IAF nas classes com valores entre valores 1,5 e 2–2,5, mostrando uma diminuição da biomassa na área analisada; percebe-se ainda que ocorresse aumento da área ocupada pela classe com menor valor do IAF (0–0,5).

Na cena de 2014 (Figura 30d), percebe-se que a área com menores valores do IAF, representada pela cor vermelha na Figura 30, aumentou sua extensão comparada aos anos anteriores (1988, 1999 e 2010) e seguiu orientada principalmente no sentido leste. Estas modificações da cobertura do uso e ocupação da terra contribuíram para a diminuição gradual da cobertura vegetal e ao mesmo tempo provocaram o aumento de áreas antropizadas, que resultaram na retirada total ou parcial da cobertura vegetal.

Considerando os resultados obtidos através da estimativa do IAF para o município de Paço do Lumiar, nas datas de 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014, é possível constatar que no período estudado, houve modificações significativas na paisagem do município.

De modo geral, a estimativa do IAF para a série de imagens analisadas apresentou aumento das áreas com pouca ou nenhuma vegetação. Assim como foi observado na estimativa do IVDN e do IVAS, os resultados da estimativa do IAF também mostraram que, as áreas com valores máximos de vegetação diminuíram no período analisado, principalmente na porção sudoeste do município de Paço do Lumiar.

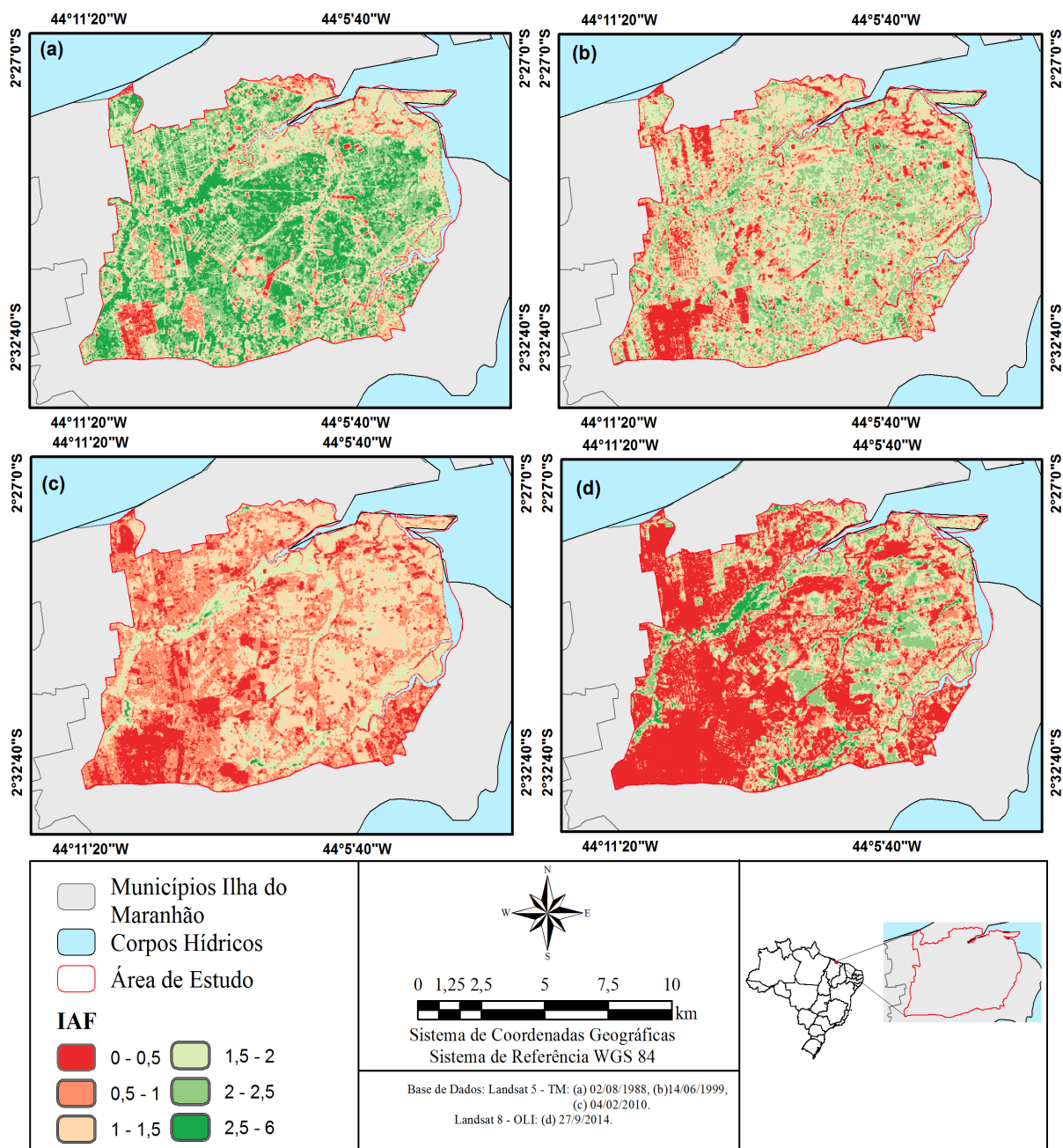


Figura 30 - Mapa do IAF do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

A estimativa dos índices de vegetação corresponde à constatação realizada na visita à área de estudo, onde verificou-se que em diversas áreas do município há presença de novos conjuntos habitacionais (Figura 31a), construção de novos empreendimentos (Figura 31b), e há presença de solo exposto (Figura 31c), que explicam o porquê dos valores mínimos dos índices de vegetação terem aumentado nos últimos anos.



Figura 31 - (a) Novos conjuntos habitacionais na zona urbana da área de estudo; (b) Construção de novos empreendimentos e (c) Área com presença de solo exposto.

Fonte: Acervo pessoal, 2016.

5.3.5 Temperatura da Superfície

A Tabela 14 apresenta a estatística descritiva da temperatura de superfície (T_s) em relação classes de uso e ocupação da terra, para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014, referente à área amostral apresentada na Figura 20. Para todas as cenas analisadas, como esperado, a classe urbano foi a que apresentou a maior média de T_s (28,22°C, 21,35°C, 26,49°C e 33,52°C), para as cenas de 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014, respectivamente. Os menores valores médios de T_s foram obtidos na classe de vegetação arbórea/arbustiva, com médias que variaram entre 24,04 e 28,44°C.

Os dados estatísticos mostram ainda que os maiores valores de desvio padrão e do coeficiente de variação ocorreram na classe de vegetação arbustiva/herbácea, o maior desvio padrão ocorreu na cena do dia 27/09/2014. O maior coeficiente de variação no dia 02/08/1988.

Tabela 14 - Temperatura estimada para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas

Anos	Estatísticas	Urbano	Vegetação Arbórea/ Arbustiva	Vegetação Arbustiva/ Herbácea	Mangue
1988	Coeficiente de Variação	0,96	1,51	2,40	0,70
	Média	28,22	24,04	24,04	24,48
	Desvio Padrão	0,26	0,24	0,53	0,23
1999	Coeficiente de Variação	0,92	0,90	1,04	1,53
	Média	26,49	24,13	25,43	24,51
	Desvio Padrão	0,26	0,19	0,25	0,27
2010	Coeficiente de Variação	2,29	0,96	0,60	1,02
	Média	27,64	24,71	25,14	24,01
	Desvio Padrão	0,32	0,19	0,23	0,21
2014	Coeficiente de Variação	1,20	1,09	2,24	0,55
	Média	33,52	28,44	32,71	26,81
	Desvio Padrão	0,22	0,24	0,59	0,12

As Figuras 32a–d representam a distribuição espacial de T_s para o período estudado. As tonalidades verde/amarelo representam as áreas com menores temperaturas, e as classes com tons laranja/vermelho são as maiores temperaturas. Para todas as cenas analisadas, a classe com valores entre 23 e 25°C foi a que apresentou a maior representatividade no município de Paço do Lumiar.

Na cena do dia 02/08/1988 (Figura 32a), a temperatura de superfície variou de 23°C a 33°C. Essa imagem apresentou a maior área com valores menores do que 25°C, isto pode ter ocorrido devido ao fato dessa data apresentar maior presença da cobertura vegetal, o que pode ter contribuído para minimizar as altas temperaturas.

Os valores da temperatura de superfície do dia 14/06/1999 representados na Figura 32b revelam que houve redução da classe com valores entre 23 e 25°C, quando comparada com a cena anterior (1988), e mostra também um crescimento da classe com valores que variam entre 25 e 27°C. Esse fato pode ser explicado devido a essas áreas possuírem os índices de vegetação mais baixos, pois, o aumento de temperatura está relacionado com a redução da cobertura vegetal, além de que, nesta data, houve maior urbanização, aumentando assim as modificações do uso e ocupação da terra.

A estimativa da temperatura revela que nas cenas analisadas, as áreas que se destacaram com as menores temperaturas de superfície foram encontradas em áreas de manguezal, nos fragmentos da vegetação arbórea/arbustiva e em corpos hídricos. Assim, estas áreas contribuíram para a amenização da temperatura. De acordo com Souza (2014)

essas áreas “podem atenuar os efeitos da urbanização e melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas, por trazer frescor e conforto térmico ao meio, principalmente nos mais adensados”.

A cena do dia 27/09/2014 (Figura 32d) foi a que apresentou as temperaturas mais elevadas, com valores variando entre 23 e 37°C. No setor sudoeste da cena observa-se que houve crescimento da classe com valores mais elevados. A classe com tonalidade laranja forte refere-se aos valores entre 33 a 35°C da temperatura de superfície, e comparado com a imagem do dia 04/02/2010, esta região teve um aumento médio de 6°C.

Vale salientar que, na comparação da temperatura de superfície entre as cenas de 04/02/2010 e 27/09/2014 deve-se levar em consideração a influência do período sazonal, pois, as imagens datam de períodos distintos relacionados às estações climáticas do ano e este fator pode influenciar na estimativa da temperatura à superfície. A imagem do dia 04/02/2010 pertence ao período com os maiores índices pluviométricos na região (período chuvoso) e a imagem do dia 27/09/2014 pertence ao período com baixos índices de pluviosidade (período de estiagem), isto pode justificar o porquê das temperaturas da cena de 27/09/2014 terem sido significativamente mais elevadas que as de 04/02/2010.

Os valores da temperatura de superfície encontrados neste estudo se assemelham aos estimados por Arantes et al. (2013) no município de Goiânia, que identificaram que no perímetro urbano, as áreas com menor temperatura foram observadas nos fragmentos de cobertura vegetal, mostrando que a vegetação na área urbana das cidades interfere na variação da temperatura de superfície melhorando o microclima urbano.

Dados semelhantes também foram encontrados no estudo de Parizoto et al. (2014), que verificaram a influência da temperatura de superfície em diferentes setores da área urbana de Piratininga/SP por meio de dados orbitais. Os resultados mostraram que as temperaturas mais elevadas foram entre 30 e 34°C nas áreas urbanas, onde há maior adensamento populacional e as temperaturas amenas variaram de 25 a 29°C. Conforme apontam Arantes et al. (2013), este padrão de temperatura é ocasionado devido à arborização urbana, constituída de espécies arbóreas de grande porte.

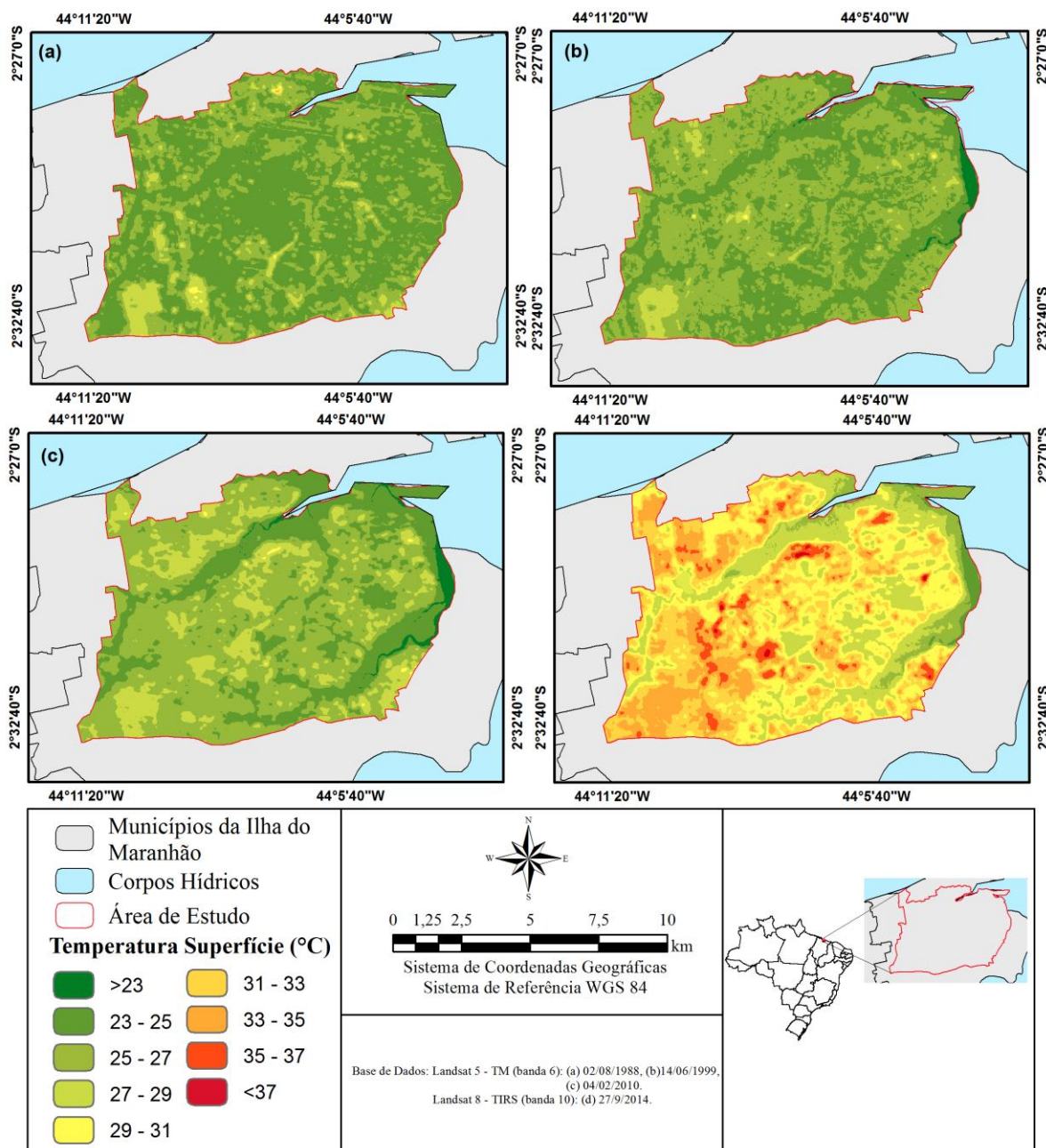


Figura 32 - Mapa da temperatura de superfície do município Paço do Lumiar (MA) para os dias: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.6 Saldo de radiação

A Tabela 15 apresenta a estatística do saldo de radiação (R_n) em W/m^2 , para os diferentes usos e ocupação da terra, nos dias em que as imagens foram adquiridas, 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 7/09/2014. A área amostral analisada na estatística é a mesma e está apresentada na Figura 20.

A estatística descritiva mostrou que os maiores valores médios de saldo de radiação (R_n) pertencem à classe de mangue. Os menores valores médios de saldo de radiação foram obtidos na cena do dia 02/08/1988, sobretudo, na classe urbano.

O maior coeficiente de variação do saldo de radiação foi observado na amostra da classe urbano, na data de 2014, cujo valor do coeficiente de variação é igual a 91,69 W/m². Essa variação pode ter ocorrido devido a área não apresentar homogeneidade dos seus valores, podendo ter tido mistura dos valores dos pixels entre a classe de vegetação herbácea com a classe urbano.

No ano de 2014, houve uma maior variabilidade nos valores do saldo de radiação com relação aos outros anos, como mostra os valores do desvio padrão em todas as classes de uso e ocupação da terra isto é, 18,86 no urbano, 3,72 na vegetação arbórea/arbustiva, 20,23 na vegetação arbustiva/herbácea e 6,68 no mangue.

Tabela 15 - Saldo de radiação estimado para os diferentes usos e coberturas da terra nas datas analisadas

Anos	Estatísticas	Urbano	Vegetação	Vegetação	Mangue
			Arbórea/ Arbustiva	Arbustiva/ Herbácea	
1988	Coeficiente de Variação	39,11	13,79	43,14	15,24
	Média	447,05	526,89	536,58	549,80
	Desvio Padrão	8,21	2,84	14,18	2,76
1999	Coeficiente de Variação	74,50	18,15	58,19	16,32
	Média	512,70	564,28	554,28	577,29
	Desvio Padrão	11,92	3,73	9,34	3,04
2010	Coeficiente de Variação	52,81	20,93	54,80	28,61
	Média	528,32	603,96	579,32	628,32
	Desvio Padrão	9,82	3,49	11,77	4,25
2014	Coeficiente de Variação	91,69	25,64	72,20	45,05
	Média	490,26	629,88	548,29	667,50
	Desvio Padrão	18,86	3,72	20,23	6,68

O balanço de radiação mostra que os máximos de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$) para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014 foram de 476,05, 480,55, 457,05 e 513,26W/m², respectivamente.

Os valores máximos da onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$) foram de 346,3, 376,71, 367,7 e 364,33W/m² para os dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014 respectivamente.

A maior intensidade da radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) foi observada no dia 27 de setembro de 2014 ($904,19\text{W/m}^2$), seguido por $816,15\text{W/m}^2$ para 4 de fevereiro de 2010, $721,49\text{W/m}^2$ para o dia 02 de agosto de 1988 e por fim $717,16\text{W/m}^2$ para o dia 14 de junho de 1999.

As Figuras 33a–d apresentam o comportamento temporal e espacial dos valores do saldo de radiação (R_n) espacializados para as datas estudadas (02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014). Os valores estimados variaram de 450 a 736W/m^2 , cujos valores mais elevados correspondem a áreas com corpos hídricos, manguezal e vegetação da classe arbórea/arbustiva e, os menores valores pertencem às classes de urbano e vegetação arbustiva/herbácea.

Comparando as quatro imagens analisadas (Figura 33), é possível identificar as áreas de corpos d'água, vegetação densa, vegetação herbácea e áreas urbanizadas, e conforme a estimativa do saldo de radiação apresentados nas cenas, verifica-se que houve uma visível diferença entre os dias estudados.

A Figura 33(a), que representa a espacialização do R_n do dia 02/08/1988, revela que, predominou a classe com valores de $500\text{--}550\text{W/m}^2$. Na estimativa do saldo de radiação do dia 14/06/1999 (Figura 33b), os valores do R_n apresentam maior representatividade na classe com valores de $450\text{--}500\text{W/m}^2$.

As Figuras 33c–d revelam que as datas de 04/02/2010 e 27/09/2014 tiveram maior representatividade dos valores mínimos do saldo de radiação ($<400\text{W/m}^2$) quando comparadas aos anos anteriores (1988 e 1999)

Leivas et al. (2007) obtiveram valores do saldo de radiação semelhantes aos estimados neste estudo. Os maiores valores foram observados em áreas com corpos hídricos e sobre vegetação, enquanto que os menores valores em regiões com solos antropizados. A estimativa do R_n mostrou valores de 585, 662 e 600W/m^2 , para solo antropizado, corpos d'água e superfícies vegetadas, respectivamente.

Andrade e Corrêa (2014) ao analisar a estimativa do saldo de radiação à superfície para a cidade de Santarém-PA, também constataram que os maiores valores do saldo de radiação são encontrados nas superfícies naturais, enquanto que os menores valores do saldo de radiação são observados em superfícies antropizadas (mancha urbana e solo exposto). Os valores de saldo de radiação obtidos foram de 633 a 683W/m^2 (na água), 523 a 632W/m^2 (na vegetação), 472 a 523W/m^2 (na malha urbana) e de 161 a 471W/m^2 (no solo exposto).

5.3.7 Análise da média aritmética de cada parâmetro biofísico (álgebra de mapas)

As Figuras 34a–f mostram as imagens resultantes da álgebra de mapas, aplicada a cada parâmetro biofísico individualmente, através de operadores de média zonal. A álgebra de mapas apresentada neste estudo é resultado da média aritmética de cada parâmetro biofísico, referente às cenas das quatro datas analisadas, isto é: 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014. Esta análise possibilitou avaliar com melhor clareza, as áreas que apresentaram maior modificação do uso e ocupação da terra nas quatro datas estudadas.

A Figura 34a, que apresenta a álgebra de mapas do albedo, mostra que houve alteração dos valores do albedo em todo o recorte estudado, isto foi observado principalmente na porção sudoeste da área de estudo. Salienta-se que nesta área foram registrados os maiores valores do albedo. Convém destacar que na porção sudoeste da área de estudo, foi onde ocorreu a maior alteração do uso e ocupação da terra no município de Paço do Lumiar.

De acordo com a espacialização dos valores da média aritmética dos índices de vegetação IVDN, IVAS e IAF, respectivamente nas Figuras 34b–d. Observa-se que os maiores valores dos índices de vegetação estão presentes na porção leste da área de estudo, localizados em áreas com presença de vegetação arbórea, conforme já discutidos.

A Figura 34e evidencia que os valores mais elevados de temperatura da superfície possuem maior representatividade na zona com maior índice de urbanização do município (porção sudoeste). Os valores mais elevados da temperatura de superfície aparecem fragmentados em toda extensão do município, exceto onde há os maiores índices de vegetação e presença de cursos d'água, podendo mais uma vez ser evidenciado que a supressão da vegetação tem relação direta com o aumento das temperaturas.

Na análise da média do saldo de radiação, espacializada na Figura 34f, constata-se que a área onde há os maiores valores do R_n corresponde as classes com vegetação de maior vigor e presença d'água. Nota-se que em grande parte do município ocorreu aumento da classe com os valores mínimos do R_n .

Na comparação entre a Figura 34a, que representa a média do albedo de superfície, e a Figura 32f, que mostra a média do saldo de radiação, percebe-se que as áreas onde há os maiores valores do albedo ocorrem os menores valores do saldo de radiação, demonstrando a relação existente entre esses dois parâmetros.

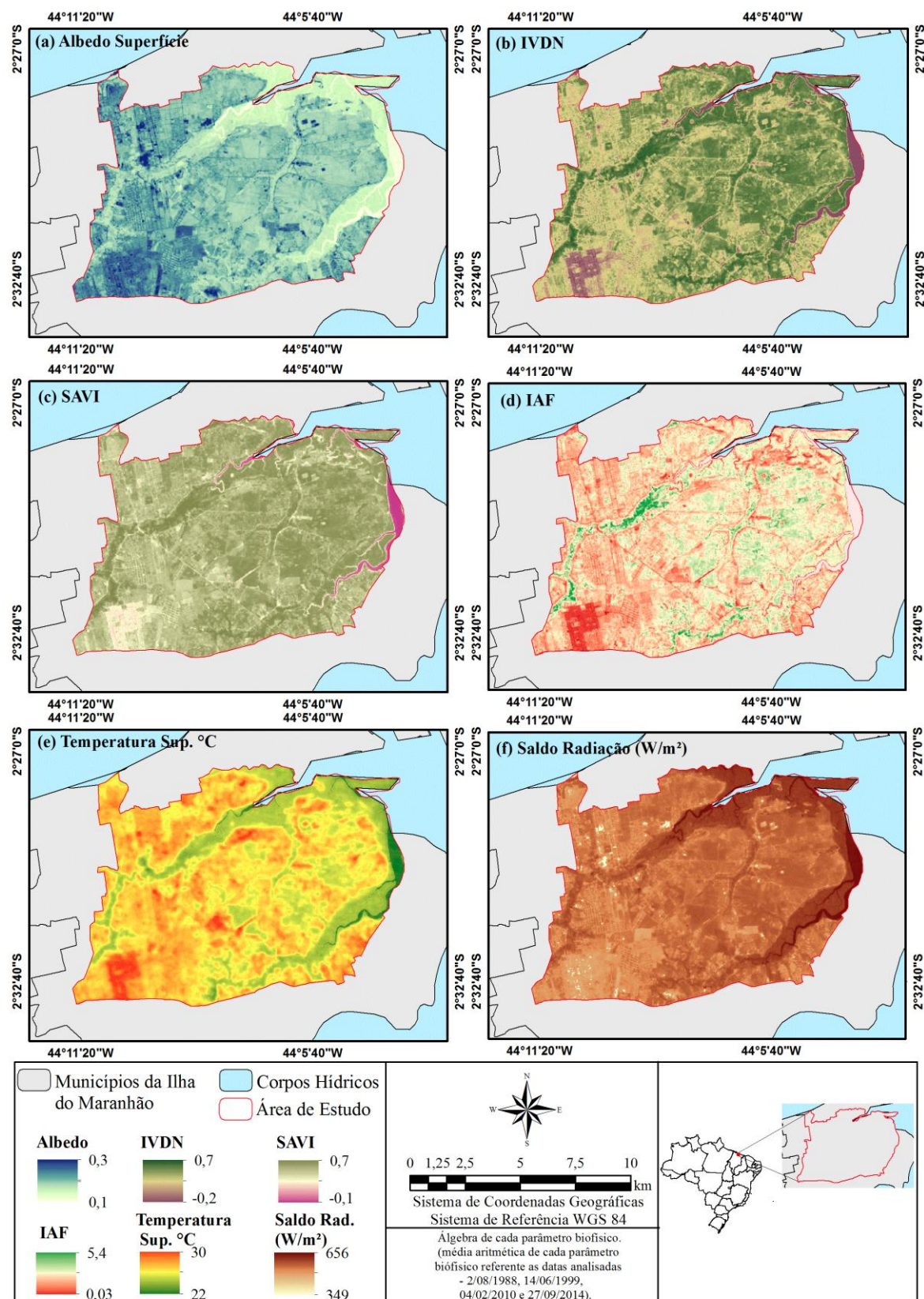


Figura 34 - Média aritmética das imagens de 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014: (a) média do albedo, (b) média do IVDN, (c) média do IVAS, (d) média do IAF, (e) média da temperatura da superfície (°C) e (f) média do saldo de radiação em W/m².

Fonte: Elaborado pela autora.

5.4 Validação da estimativa de temperatura à superfície

São apresentados a seguir os dados que possibilitaram a comparação entre a T_o e T_s . Estes dados são apresentados para avaliar a relação entre a temperatura observada (T_o), que representa a temperatura do ar medida na estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e a temperatura de superfície terrestre (T_s) obtida através das imagens de satélite.

É mostrado na Tabela 16 a média dos valores calculada para o pixel de referencia (Pixel 5) e pixels adjacentes (Pixel 1, 3, 4, 6, 7, 8 e 9), para as quatro datas analisadas (02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014). A Figura 35 ilustra a localização de cada pixel em relação ao pixel de referência.

Tabela 16 - Temperatura estimada (T_s) do pixel de referência e dos pixels adjacentes à estação meteorológica do INMET entre 1988 e 2014

	Latitude	Longitude	1988	1999	2010	2014
Pixel 1	2°31'34,97"S	44°12'49,817"W	24,76	25,91	27,88	28,11
Pixel 2	2°31'35,059"S	44°12'48,837"W	24,89	25,85	27,84	28,22
Pixel 3	2°31'34,803"S	44°12'47,747"W	24,88	25,62	27,88	28,14
Pixel 4	2°31'36,077"S	44°12'49,823"W	24,65	25,61	27,87	28,87
Pixel 5	2°31'36,171"S	44°12'48,811"W	24,64	25,73	27,82	28,59
Pixel 6	2°31'37,413"S	44°12'50,554"W	24,59	25,56	27,83	28,37
Pixel 7	2°31'36,878"S	44°12'49,882"W	24,47	25,94	27,86	28,84
Pixel 8	2°31'36,972"S	44°12'49,029"W	24,54	25,96	27,88	28,67
Pixel 9	2°31'36,924"S	44°12'47,98"W	24,72	25,75	27,89	28,65
Média			24,68	25,77	27,86	28,49

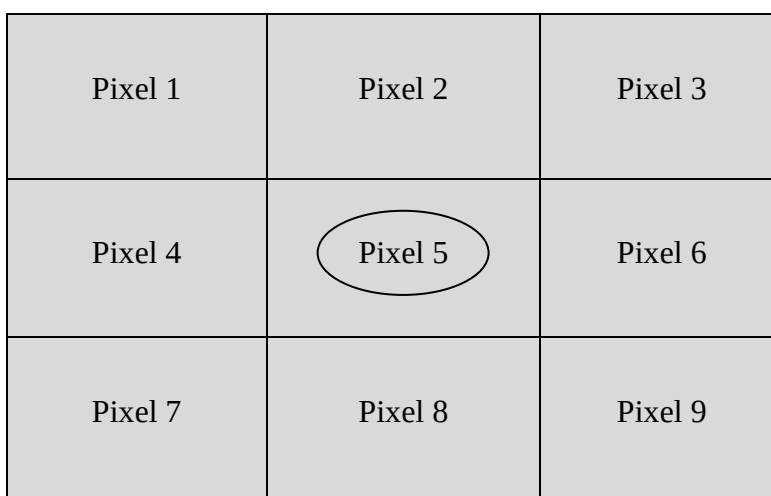


Figura 35 - Localização de cada pixel em relação ao pixel de referência – “Pixel 5”.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados da temperatura do ar, obtidos na estação meteorológica foram comparados aos dados de temperatura de superfície, estimados a partir das imagens de satélite. A Tabela 17 mostra o coeficiente de variação e o erro médio entre os dados de temperatura observados e os estimados (média dos nove pixels). Os resultados mostram que os valores de T_s subestimaram os de T_o . Os valores do erro médio oscilaram entre -0,72 e -2,43°C, entretanto, apresentaram um bom ajuste entre os dados estimados e observados, com o coeficiente de determinação de Pearson (R^2) igual a 0,84.

A Tabela 18 apresenta o coeficiente de variação e o erro médio entre os dados de temperatura do ar, obtidos na estação, e a temperatura estimada (pixel de referência). Nota-se que, o menor erro médio na comparação entre T_o e T_s , foi de -0,76°C, para a temperatura de 02/08/1988, e o maior erro médio entre a T_o e T_s foi de -2,47°C, para as temperaturas do dia 14/06/1999. O coeficiente de determinação obtido da comparação entre T_o e T_s foi de 0,83.

Tabela 17 - Coeficiente de variação e erro médio entre os dados de temperatura do ar obtidos na estação meteorológica do INMET e temperatura de superfície (considerando a média dos nove pixels)

Data	Temperatura Observada (°C)	Temperatura Estimada (°C) (média dos nove pixels)	Variação (%)	Erro Médio
02/08/1988	25,4	24,68	-2,83	-0,72
14/06/1999	28,2	25,77	-8,61	-2,43
04/02/2010	29,6	27,86	-5,87	-1,74
27/09/2014	29,5	28,49	-3,42	-1,01

Tabela 18 - Coeficiente de variação e erro médio entre os dados de temperatura do ar obtidos na estação meteorológica do INMET e temperatura de superfície (considerando o valor do pixel de referência).

Data	Temperatura Observada (°C)	Temperatura Estimada (°C) (pixel de referência)	Variação (%)	Erro Médio
02/08/1988	25,4	24,64	-2,99	-0,76
14/06/1999	28,2	25,73	-8,76	-2,47
04/02/2010	29,6	27,82	-6,01	-1,78
27/09/2014	29,5	28,59	-3,08	-0,91

Ao comparar o coeficiente de variação e o erro médio entre T_o e T_s , considerando valor do pixel de referência ou a média dos nove pixels (*pixel* de referência e *pixels* adjacentes), apresentados nas Tabelas 17 e 18, percebe-se que não foram detectadas diferenças significativas entre os dois cálculos, porém observa-se que a média dos nove pixels apresentou menor erro médio. Esses resultados podem ser explicados por uma

possível homogeneidade dos valores da temperatura da superfície ao considerar a média dos nove pixels.

Com relação à subestimativa da temperatura de superfície (T_s), Weng (2003) esclarece que, normalmente, a temperatura de superfície obtida por imagens de satélite apresenta valores mais elevados que a temperatura do ar obtida na estação meteorológica. Coelho (2013) faz uma ressalva, e diz que “na prática essa diferença não infere nos resultados, uma vez que a temperatura quantificada pelo satélite é a temperatura radiante da superfície”; ou seja, a variação de T_s em relação a T_o irá depender das condições meteorológicas no momento exato do imageamento do satélite na área analisada.

Na literatura, são encontrados alguns estudos que T_s também foi inferior a T_o . Como exemplo, pode-se citar o estudo desenvolvido por Leite e Brito (2012b), que obtiveram resultados de temperatura estimada inferiores às observadas em três imagens (1985, 1995 e 2010), para a bacia do Rio Vieira no norte de Minas Gerais.

Como mostrado, as temperaturas de superfície, obtidas através da banda termal do Landsat, apresentaram boa correlação com as temperaturas do ar observadas na estação meteorológica. Isto evidencia que há boa concordância entre as estimativas de temperatura obtidas com o uso de imagens termais e a temperatura do ar obtida na estação meteorológica. Desta maneira, é mostrado a habilidade dos sensores *Thematic Mapper* (TM) do Landsat 5 e do sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) do Landsat 8 em representar com eficiência a variação de temperaturas de superfície.

5.5 Perfil do campo térmico da superfície urbana e topografia da zona urbana de Paço do Lumiar

5.5.1 Perfil do campo térmico de superfície urbana

A Figura 36 apresenta a localização dos perfis do campo térmico dos eixos A–B, C–D e E–F. Como exposto anteriormente, os perfis de temperatura de superfície foram traçados com o objetivo de representar com maior detalhe a variação da temperatura na área urbana do município de Paço do Lumiar.

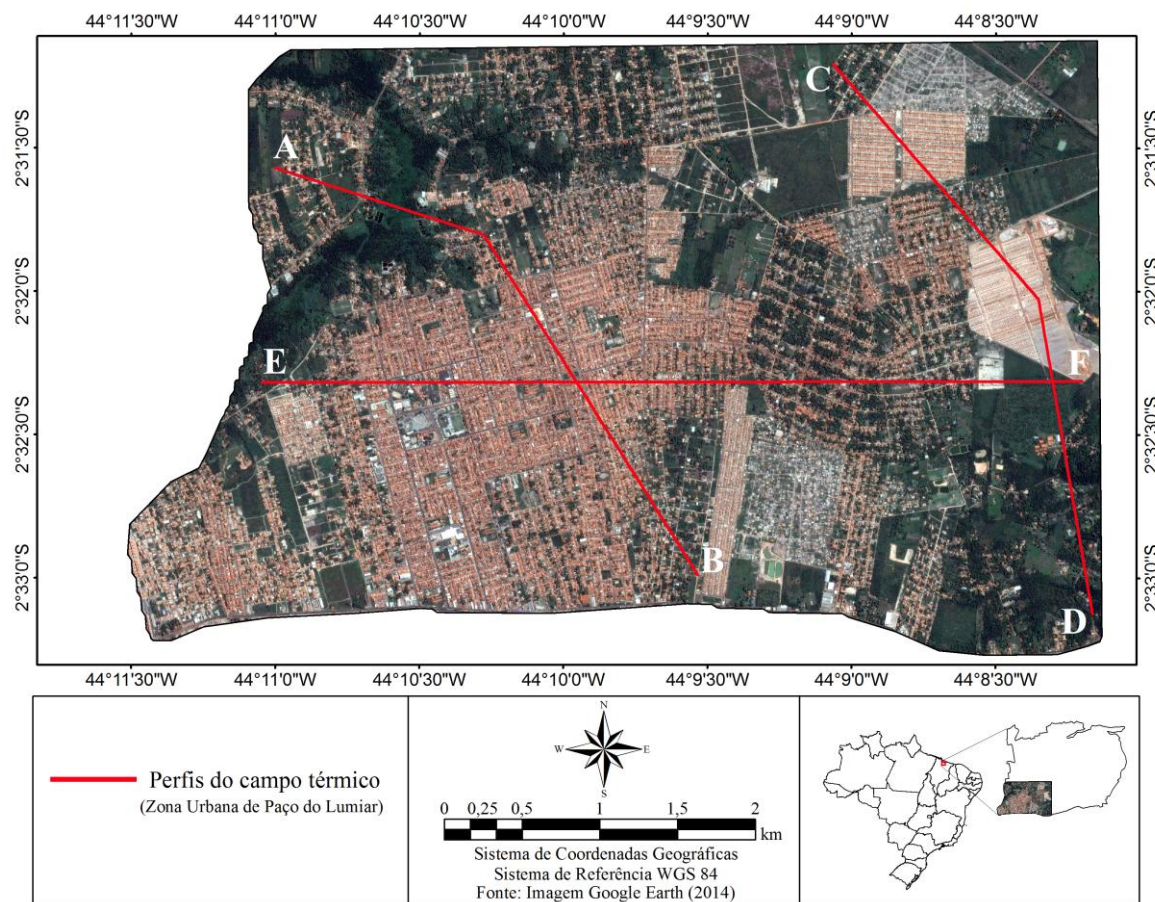


Figura 36 - Mapa mostrando os traçados dos perfis da temperatura de superfície (eixos A-B; C-D; E-F)
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 37 mostra o perfil da temperatura de superfície do eixo A-B, com 3 km de extensão. Percebe-se que nesse eixo, na cena de 1988, a amplitude térmica foi de 5°C, com mínima de 23°C e máxima de 27°C. Em 1999 e 2010 a amplitude foi de 4°C, com mínima de 19°C e máxima de 22°C, e em 2014 ocorreu a maior amplitude (9°C), com mínima de 27°C e máxima de 35°C.

Notou-se no traçado do perfil A-B, que a área apresenta significativa variação espaço-temporal da temperatura de superfície, com destaque para a imagem do ano de 2014. Para essa imagem, percebe-se mais claramente a importância das áreas com cobertura vegetal e corpos hídricos para o conforto urbano, evidenciando a existência de microclimas (ilha de frescor). A maior queda nos valores de temperatura ocorreu no intervalo entre 0,4 e 1,1 km, devido ao fato da presença, nesse trecho, de cobertura vegetal arbórea, arbustiva e presença de corpos hídricos (Rio Paciência).

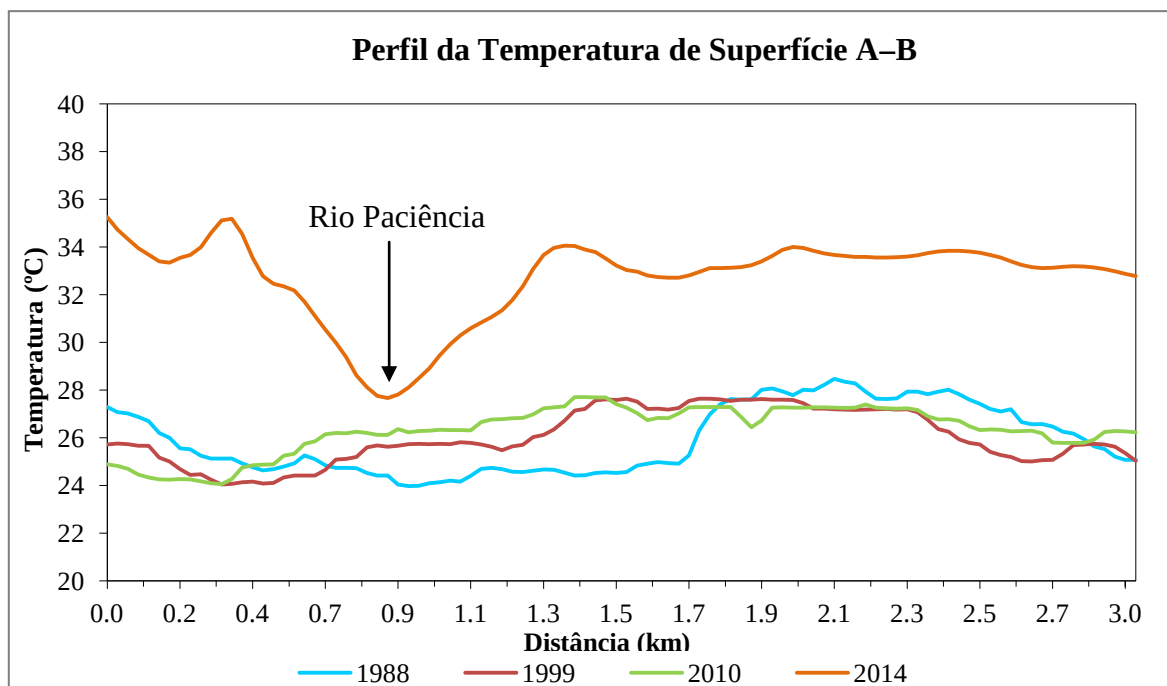


Figura 37 - Gráfico do perfil de temperatura de superfície do eixo A-B nos dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

No traçado do perfil C–D, com 3,5 km de extensão (Figura 38), percebe-se as modificações na temperatura entre os anos analisados. As alterações são observadas principalmente no trecho entre 0,3 e 2,1 km. Nota-se que os anos de 1988 e 1999, apresentaram maior similaridade entre os valores da temperatura.

Nos anos de 2010 e 2014, houve elevação da temperatura entre o intervalo de 0,3 e 2,1 km. Para a data de 2010, a elevação de temperatura ocorreu principalmente no intervalo entre 0,3 e 1,6 km e para a data de 2014 a elevação da temperatura ocorreu entre 0,3 e 2,1 km.

O aumento da área com temperaturas mais elevadas pode ter ocorrido como consequência da redução da cobertura vegetal e do aumento da área antropizada (construção de novos conjuntos habitacionais, e adensamento da malha urbana).

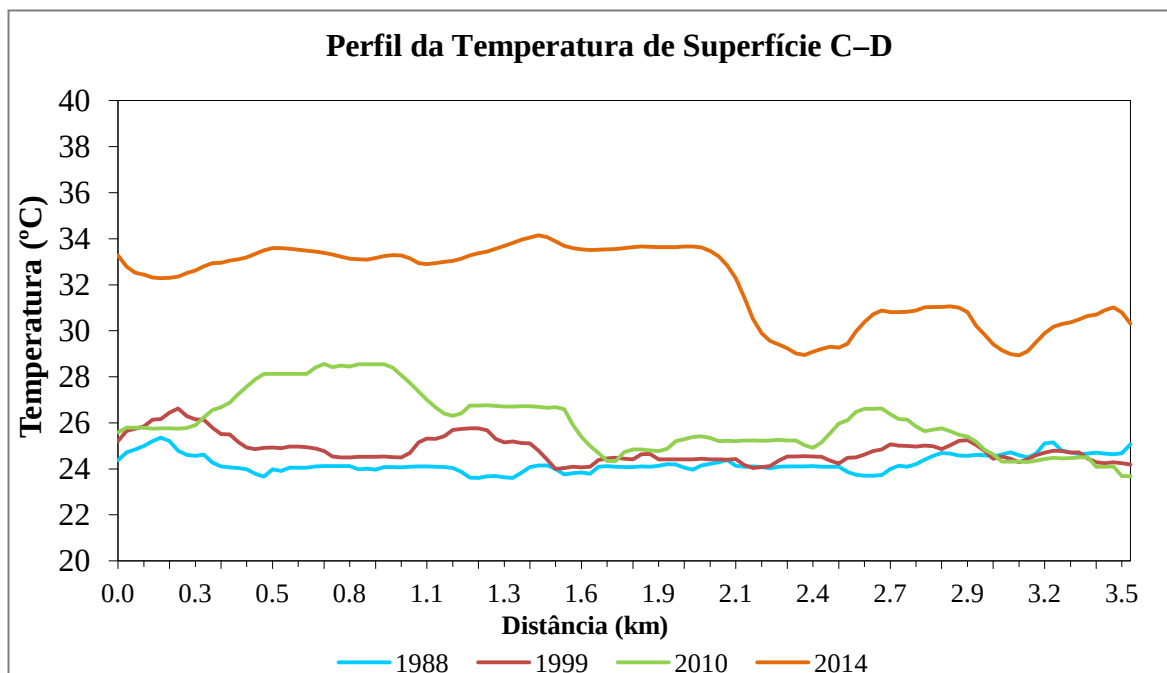


Figura 38 - Gráfico do perfil de temperatura de superfície do eixo C-D nos dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 39 apresenta o gráfico do perfil de temperatura da superfície do eixo E-F nas datas estudadas. Cabe ressaltar que na imagem de 02/08/1988 os maiores valores de temperatura estimada ocorreram entre 3,1 e 4,1 km, mais precisamente em área de solo exposto. Pode-se destacar que a imagem de 27/09/2014 foi a que apresentou os maiores valores de temperatura estimada e a maior área com ocorrência das temperaturas mais elevadas. Isto pode ser explicado pela expansão da malha urbana do município na porção sudoeste (crescimento na direção leste/oeste) e pela elevação da temperatura no bairro do Maiobão, bairro mais densamente ocupado da área de estudo e onde ocorreu maior alteração da cobertura da terra.

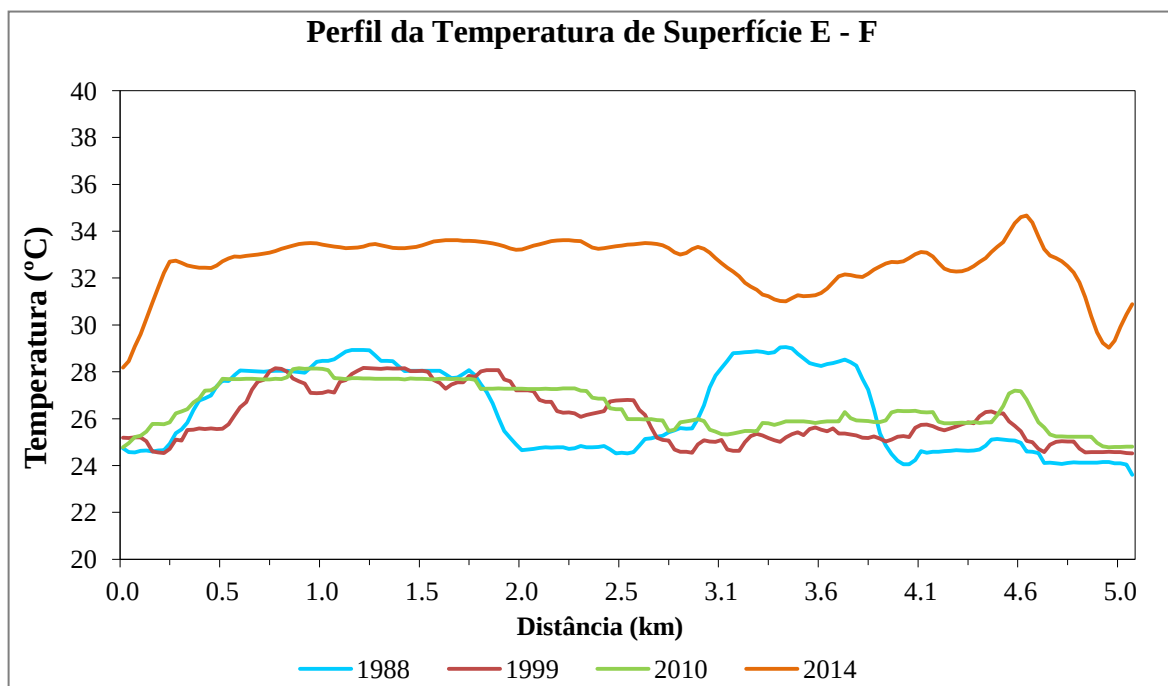


Figura 39 - Gráfico do perfil de temperatura de superfície do eixo E-F nos dias 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010, 27/09/2014

Fonte: Elaborado pela autora

5.5.2 Topografia e variação de temperatura da superfície

A temperatura de superfície, além de depender de uma série de fatores externos e internos (incidência de radiação, ciclo diário e anual das condições climáticas, umidade e cobertura do uso e ocupação da terra), pode sofrer interferência também da topografia.

De acordo com Fialho (2009), os aspectos relacionados com a inclinação das vertentes e posição geográfica e trajetória aparente do sol contribuem para a variação no balanço de energia, por meio do sombreamento das encostas, e modifica os elementos do clima. Por isso, o conhecimento das feições topográficas é de extrema importância nos estudos climáticos. Coelho (2014) corrobora com Fialho (2009) ao afirmar que “o conhecimento das feições topográficas de um determinado recorte espacial de detalhe é de extrema importância nos estudos climáticos, pois neles podem existir significativas diferenças de microclimas”.

Deste modo, com a finalidade de estudar os efeitos da topografia na variação da temperatura, em escala de detalhe, é apresentado a seguir a representação da topografia (curvas de nível) com a espacialização dos valores da temperatura de superfície, da zona urbana de Paço do Lumiar, para as datas analisadas neste estudo (Figuras 40–43).

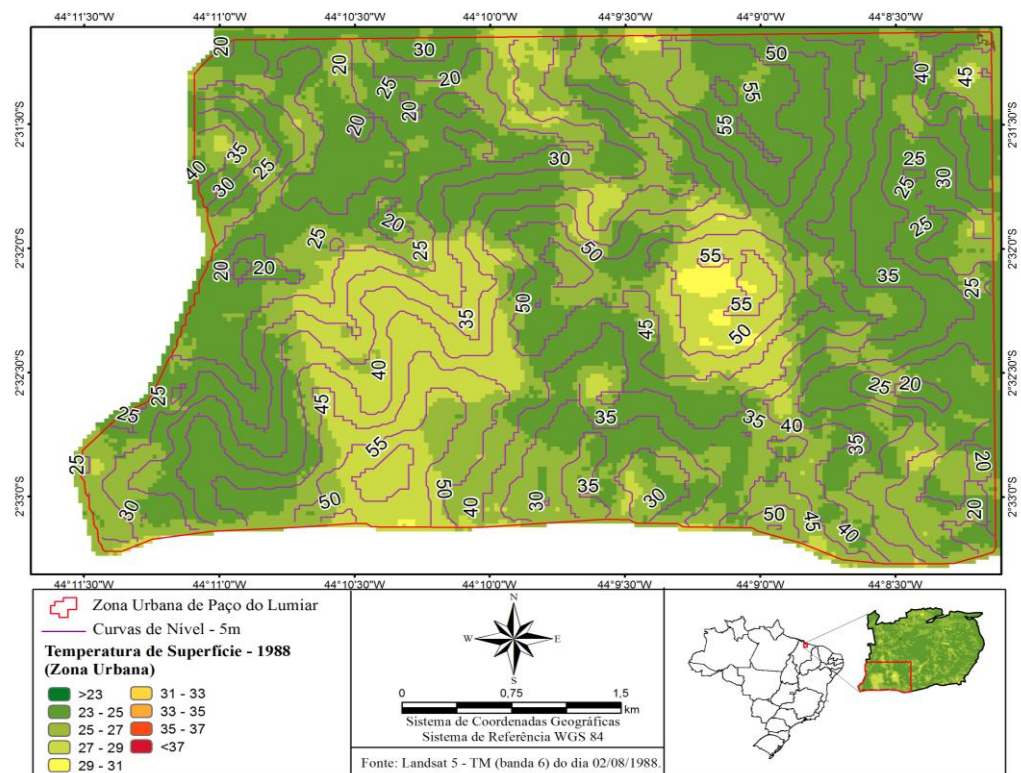


Figura 40 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (02/08/1988).
Fonte: Elaborado pela autora.

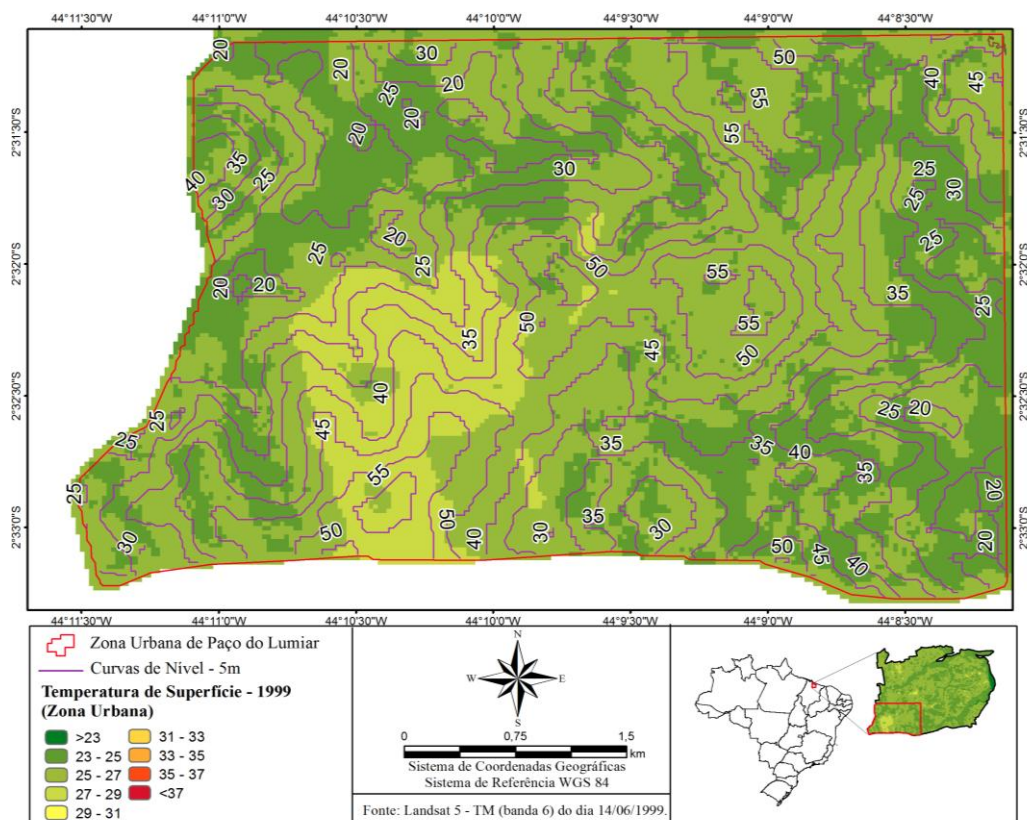


Figura 41 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (14/06/1999).
Fonte: Elaborado pela autora.

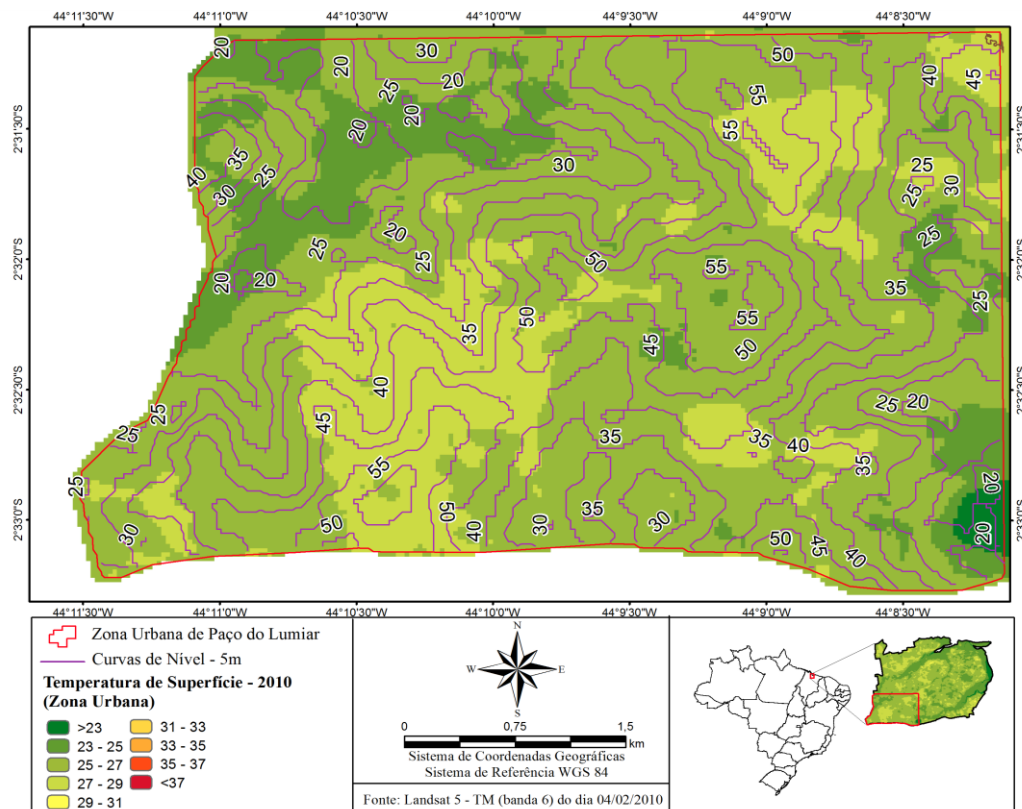


Figura 42 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (04/02/2010).
Fonte: Elaborado pela autora.

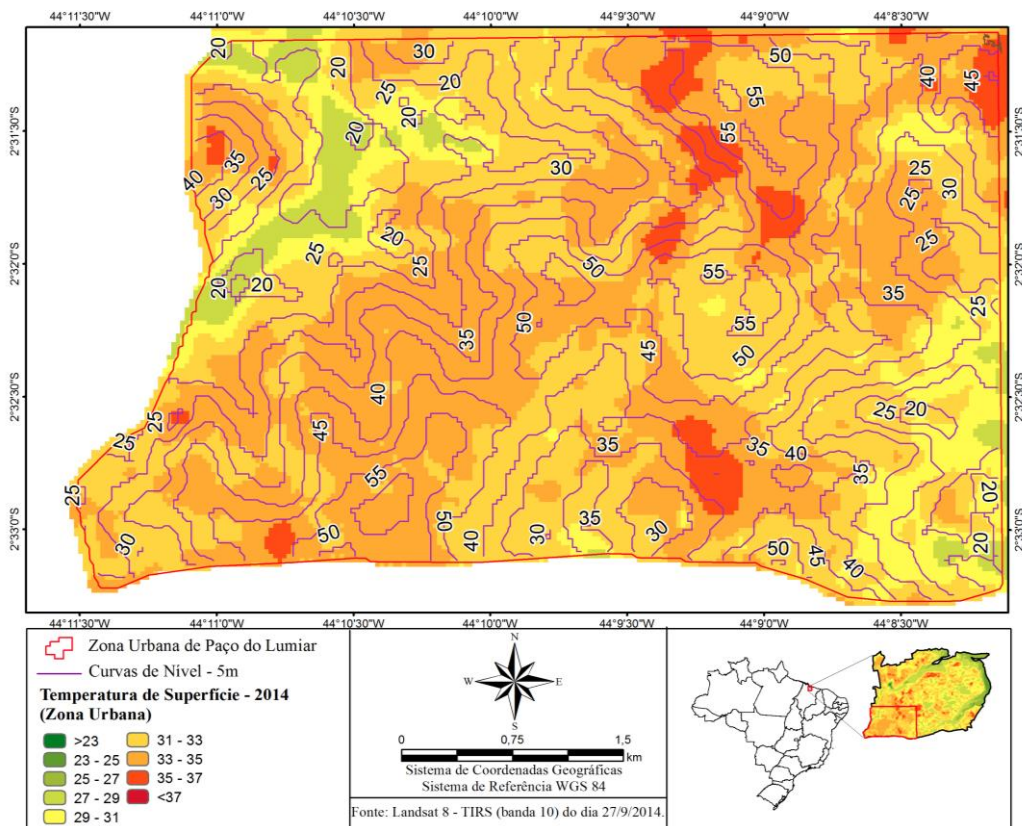


Figura 43 - Mapa altimétrico e térmico da zona urbana de Paço do Lumiar (27/09/2014).
Fonte: Elaborado pela autora.

Vale salientar que área de estudo está localizada em uma região de topografia suave, cujas cotas altimétricas não ultrapassam 55 m de altitude, ainda assim, não deve ser desconsiderada a possibilidade da temperatura de superfície ter sofrido interferência da topografia

Convém destacar que quanto maior for a altitude, menor será a temperatura. O decréscimo da temperatura em relação a altitude está relacionado com a diminuição da radiação terrestre, a medida que ocorre o aumento da altitude (BARBIRATO et al., 2007). Porém, como pode ser percebido, na análise das Figuras 40 - 43, as maiores temperaturas de superfície foram observadas nas áreas com altitudes mais elevadas. Vale salientar que nessa área, com presença de altitudes mais elevadas, é onde concentra a maior densidade de urbanização.

Desta maneira, considera-se que as altas temperaturas nas áreas com maior altitude estão relacionadas com o processo de urbanização, ou seja, modificação da cobertura do uso e ocupação da terra. Convém destacar que a topografia, não deve ser entendida como determinante para justificar as altas temperaturas da região.

Nas Figuras 40 - 43 apresentadas anteriormente, percebe-se que as áreas com uma topografia mais suave, com cotas altimétricas variando entre 20–25 m apresentaram temperaturas mais baixas em todas as datas, o que pode indicar pouca incidência da radiação solar nessa região e melhor circulação do ar, em virtude de ser um município litorâneo.

As Figuras 44a–d apresentam os histogramas de frequência dos valores da temperatura de superfície da zona urbana de Paço do Lumiar, para as datas analisadas. Nos histogramas referentes aos dias 02/08/1988 e 14/06/1999 (Figura 44a–b), nota-se que a maior frequência dos valores da temperatura de superfície ocorre na classe entre 24 e 26 °C, aproximadamente.

A Figura 44(c) mostra o histograma da temperatura de superfície de 04/02/2010. Percebe-se que a temperatura nesta data apresentou-se mais concentrada na classe com valores entre 26 e 28°C. No histograma da imagem do dia 27/09/2014, ilustrado na Figura 44(d), os valores da temperatura de superfície apresentam maior frequência na classe com valores entre 32 a 34°C, mostrando que esta data apresentou os maiores valores da temperatura de superfície entre as quatro datas analisadas.

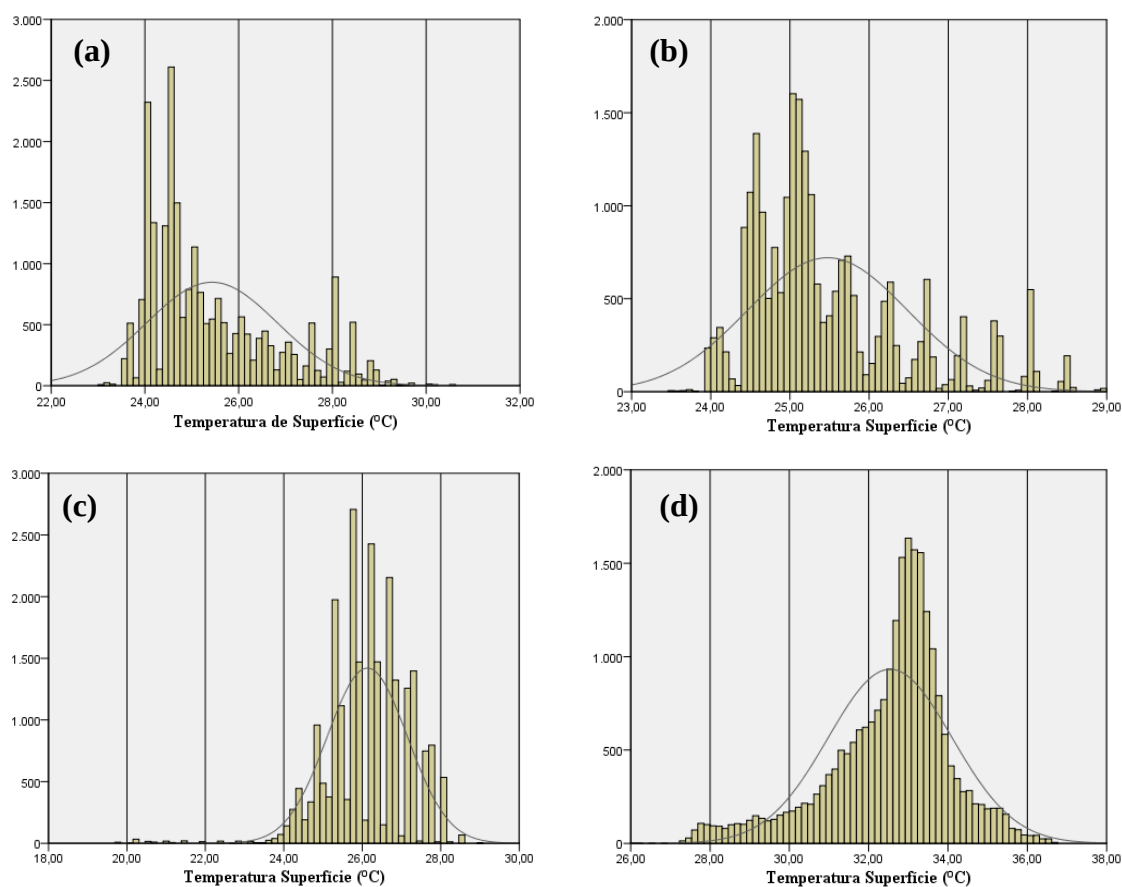


Figura 44 - Histograma de frequência e curva de distribuição normal da temperatura de superfície da zona urbana: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os histogramas e as curvas de distribuição normal, mostram ainda que os valores da temperatura de superfície, apresentam variabilidades distintas para cada data analisada. Percebe-se que a distribuição dos valores da temperatura de superfície de 02/08/1988 e 14/06/1990 apresenta maior variabilidade, comparado com a distribuição dos valores da temperatura de superfície de 04/02/2010 e 27/09/2014.

5.6 Modificação dos padrões de uso da terra e sua relação com a temperatura: análise do bairro Maiobão

Para analisar as modificações no comportamento da temperatura da superfície na área urbana de Paço do Lumiar, com escala de detalhe, foi escolhida uma porção do município, o bairro do Maiobão, local onde foram registrados os maiores valores da temperatura de superfície. As Figuras 45a–d mostram as temperaturas de superfície para os anos em apreço no bairro do Maiobão.

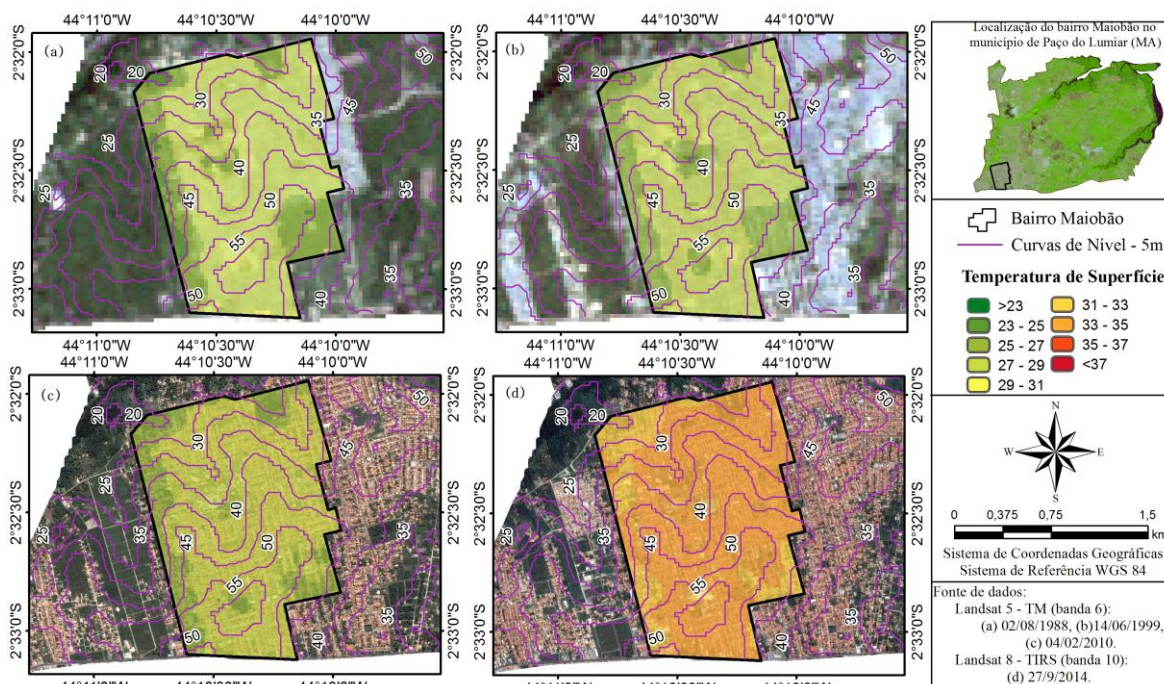


Figura 45 - Temperatura de superfície do bairro Maiobão: (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014

Fonte: Elaborado pela autora.

As altas temperaturas de superfície do bairro Maiobão, também podem ser justificadas pela modificação no padrão da cobertura do uso e ocupação da terra. Na área que envolve a Praça do Viva do Maiobão, que está localizada no centro do bairro Maiobão, destacado em vermelho na Figura 46, houve redução da cobertura vegetal ao longo dos anos, como mostram as imagens de alta resolução da área em questão. Isto é percebido principalmente nas áreas circunscritas em amarelo, que mostram a área em 2010 (Figura 46a) e em 2014 (Figura 46b).



Figura 46 - Modificação da cobertura do uso e ocupação da terra no bairro Maiobão (Praça do Viva Maiobão) - (a) 2010 e (b) 2014

Fonte: Google Earth (2010; 2014).

A Figura 47 apresenta com maior detalhe, as modificações da cobertura da terra e a variação da temperatura na Praça do Viva do Maiobão, nas datas analisadas. As Figuras 47(1–4) mostram as imagens do satélite na composição RGB, para as datas 02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014, respectivamente. As Figuras 47(a–d) mostram a imagem termal da praça, para as respectivas datas (02/08/1988, 14/06/1999, 04/02/2010 e 27/09/2014).

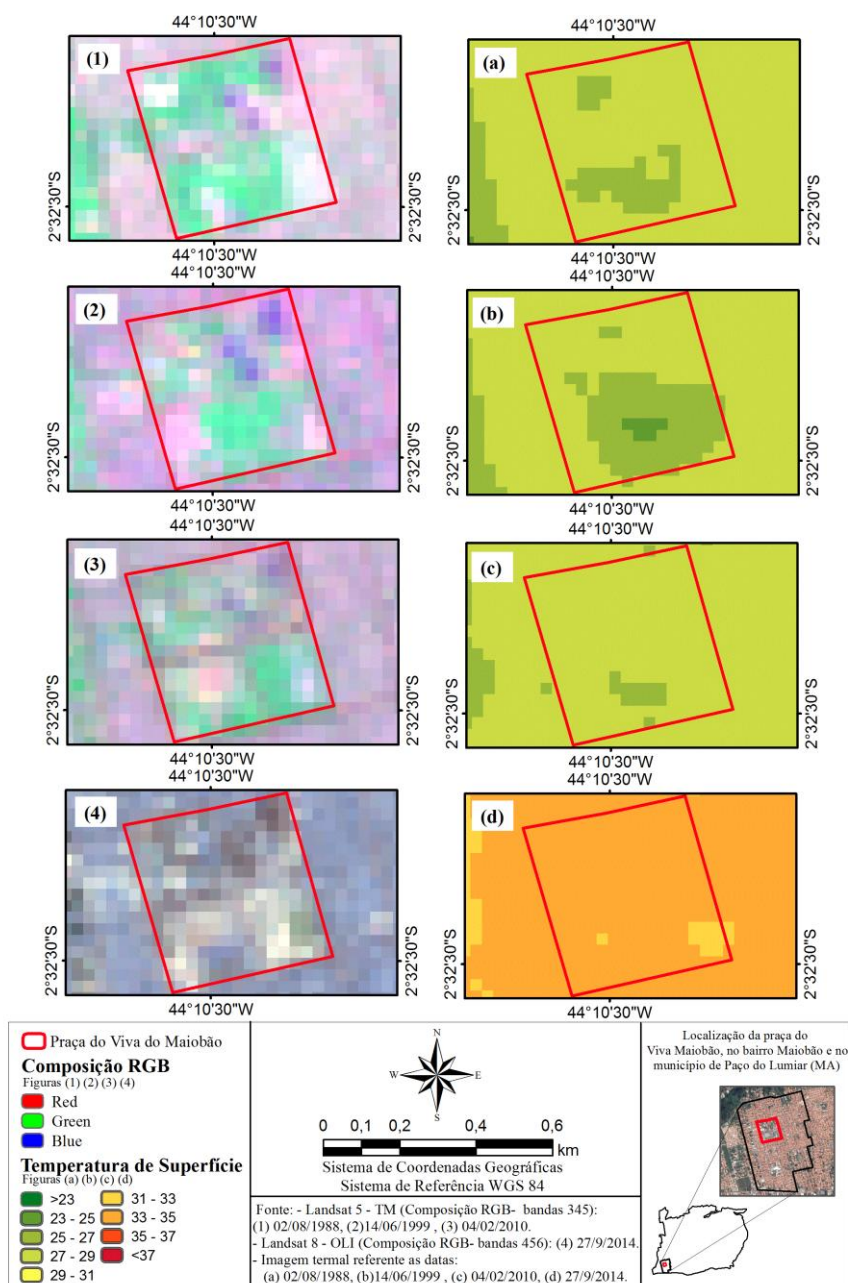


Figura 47 - Composição RGB e imagem termal da Praça do Viva do Maiobão, localizada no bairro Maiobão. Figuras 47 (1–4) composição RGB das imagens de satélite, (1) 02/08/1988, (2) 14/06/1999, (3) 04/02/2010 e (4) 27/09/2014. Figuras 47(a–d) imagem termal, (a) 02/08/1988, (b) 14/06/1999, (c) 04/02/2010 e (d) 27/09/2014.

Fonte: Elaborado pela autora.

Sobre a análise relacionada aos padrões de cobertura da terra e às variações de temperatura na Praça do Viva do Maiobão, nota-se que a supressão da cobertura vegetal pode ter sido um dos fatores que contribuíram para a elevação da temperatura nessa região. Como pode ser percebido, a medida que houve redução de vegetação, representada pelos pixels verdes nas Figuras 47(1–4), percebe-se a elevação da temperatura de superfície, como mostra as Figuras 47(a–d).

5.6 Padrões de cobertura e uso da terra e temperaturas de superfície (2014)

Buscando observar melhor as variações ocorridas na temperatura da superfície sobre a cidade de Paço do Lumiar, e considerando que a data de 27/09/2014 foi a que apresentou a maior amplitude de temperatura, se julgou necessário analisar de forma mais detalhada os padrões de cobertura da terra desta data.

Quanto às feições do ambiente intraurbano de Paço do Lumiar, é possível localizar e discriminar as áreas com maior e menor temperatura de superfície; desta forma, a análise mostrada na Figura 48, apresenta a cobertura da terra e a variação térmica intraurbana do município de Paço do Lumiar, estimada através da imagem termal do dia 27/09/2014 do satélite Landsat 8.

Quanto às feições interurbanas detectadas, na Figura 48, é possível constatar que áreas com presença de corpos hídricos são caracterizadas por temperatura amenas, comparativamente às outras feições da paisagem. Isto ocorre em decorrência da baixa incidência de radiação solar que chega à superfície, e ainda pelos altos níveis de fluxo de calor latente, devido a uma maior quantidade de água disponível para os processos de evaporação.

Em áreas com grande densidade de urbanização e onde as construções são constituídas de materiais não evaporativos e impermeáveis, a exemplo, o concreto e os telhados de amianto, como mostrado na Figura 48, apresentam temperaturas da superfície mais elevadas. Isto mostra que os fluxos de calor de fontes antropogênicas, podem modificar significativamente o microclima de um lugar.

De acordo com Santos (2011), considera-se que as propriedades radiativas e térmicas dos materiais utilizados no ambiente urbano, a exemplo, emissividade e condutividade térmica, constituem-se em “forte influência para a formação do fenômeno ilha de calor, visto que elas determinam como a radiação de ondas curta e longa é refletida, absorvida, emitida e armazenada”.

Na Figura 48, nota-se que áreas com temperaturas maiores que 35°C, ocorreram também em locais com presença de solo exposto. Este fator ocorre devido o solo exposto absorver maior parcela da radiação incidente do que os ambientes com cobertura vegetal, resultando em maior aquecimento da superfície.

Através da análise da temperatura de superfície e dos padrões de cobertura da terra, da zona urbana de Paço do Lumiar, ilustrado com maior detalhe na Figura 48, fica evidenciado que as áreas cobertura vegetal contribuem para a existência de temperaturas amenas, principalmente em áreas com presença de vegetação densa.

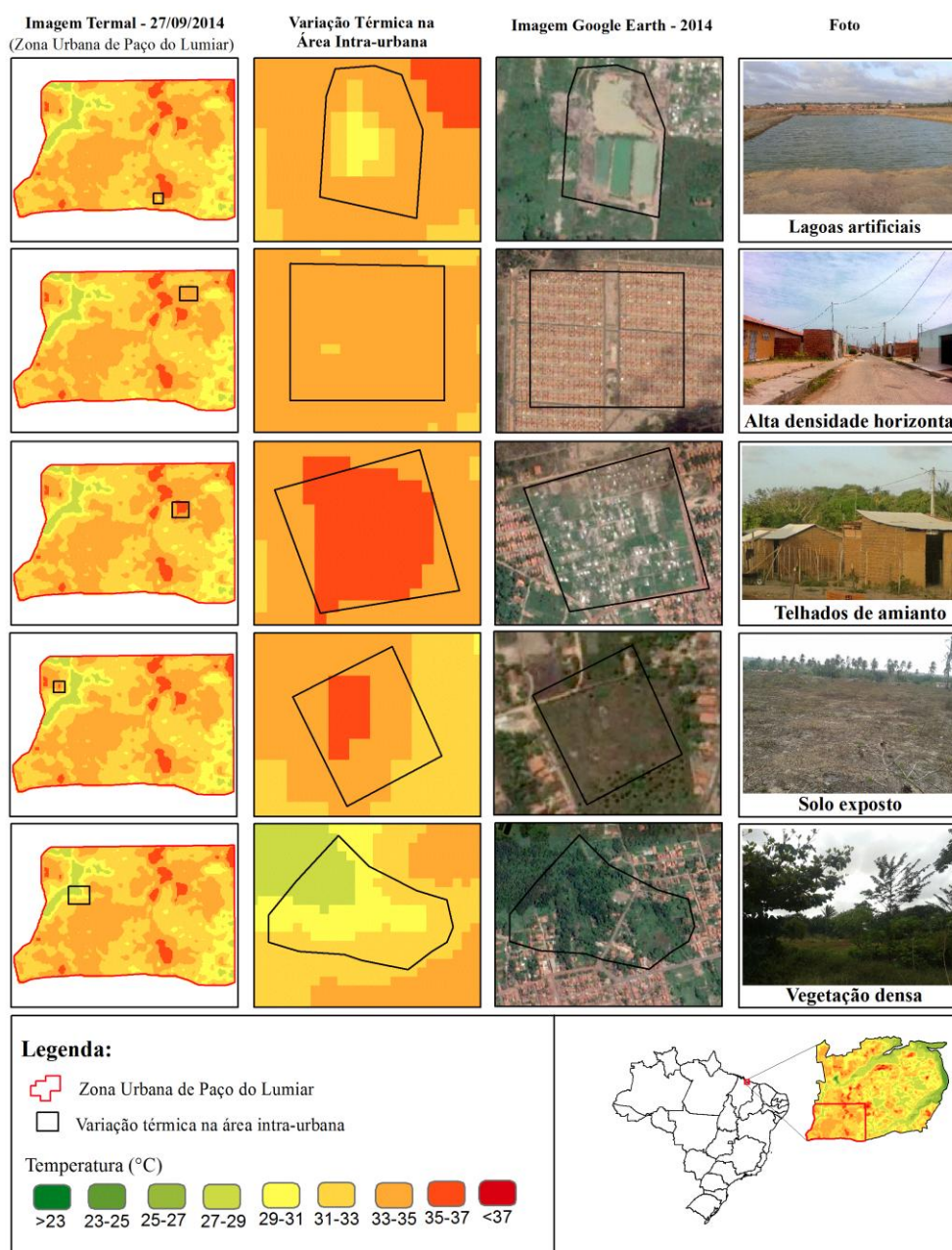


Figura 48 - Cobertura e uso da terra e variação de temperatura de superfície interurbana (imagem termal do dia 27/09/2014).

Fonte: Elaborado pela autora.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foi analisado a influência do uso e ocupação da terra no surgimento de ilhas de calor na cidade de Paço do Lumiar - MA, através da classificação do uso e ocupação da terra, análise da degradação ambiental, estimativa de parâmetros biofísicos (índices de vegetação, albedo, temperatura de superfície e saldo de radiação).

Os dados da classificação do uso e ocupação da terra mostram que houve mudanças na cobertura da terra em diferentes áreas do município de Paço do Lumiar durante as datas analisadas. Constatou-se expansão urbana acelerada, isto foi resultado do adensamento populacional, principalmente relacionado ao aumento do número de conjuntos habitacionais, que imprimiu significativas transformações ao espaço. As transformações do uso e ocupação da terra são significativas, podendo ser pontuadas as seguintes: a) redução da cobertura vegetal do tipo arbustiva/arbórea. Estas, que, em 1988, ocupavam 45,95 km² da área de estudo, passaram, em 2014, a ocupar apenas 23,84km². b) aumento da classe urbano. Esta classe passou de 10,84km² em 1988 para 22,47km² no ano de 2010.

O estudo da degradação ambiental, no município de Paço do Lumiar, entre os anos de 1988 a 2014, mostrou que onde houve maior taxa de degradação foi na classe arbórea/arbustiva, seguida da classe de mangue. Considera-se que devem ser adotadas medidas gestão correta do uso e ocupação da terra, de forma que possa contribuir para reverter as alterações negativas ocorridas na cobertura vegetal na área de estudo.

Houve significativa modificação dos valores do saldo de radiação nas datas analisadas, esta modificação ocorreu em consequência da alteração do uso e ocupação da terra. A maior frequência do saldo de radiação foi de 500-550 W/m² na cena de 1988. A cena de 2014 apresentou maior variação R_n , com valores variando entre 450 - 736 W/m², a maior variação do saldo de radiação nessa cena é atribuída a maior incidência radiação solar nessa data.

O uso das bandas termais dos satélites mostrou-se de muita utilidade para pesquisas do comportamento térmico, possibilitou observar a distribuição da temperatura da superfície. Com base nas análises realizadas, foi possível contatar que as temperaturas de superfície apresentam variação temporal e, sobretudo, espacial, variando de acordo com os diferentes tipos de cobertura da terra.

A cena que apresentou a maior variação da temperatura foi a de 27/09/2014, isto se deve não somente a mudança do padrão de cobertura da terra, mas também em virtude o período sazonal da imagem. Os resultados mostraram predominância das faixas de

temperatura superficiais mais altas, percebeu-se que, apenas uma pequena porção do território de Paço do Lumiar nessa data (2014) apresenta faixas amenas de temperatura de superfície ($>23^{\circ}\text{C}$). O perfil da temperatura mostrou que, as temperaturas de superfície em Paço do Lumiar na data de 2014, teve amplitude de 9°C . As temperaturas mais elevadas são observadas principalmente em casas com telhado de amianto e nas áreas sem cobertura vegetal ou com vegetação herbácea.

Foi observado que o ambiente térmico do bairro Maiobão, localizado na zona urbana de Paço do Lumiar, foi influenciado pela redução das áreas verdes. A mudança da cobertura da terra contribuiu para a alteração da temperatura de superfície nessa área.

Em suma, foi possível constatar que o crescimento da área urbana, adensamento populacional e as alterações do calor antropogênico, apresentam relação direta com modificações no microclima de Paço do Lumiar e consequentemente intensificação do fenômeno de ilhas de calor. Conforme pode ser verificado, através da estimativa de temperatura, é possível afirmar que, a intensidade do fenômeno de ilhas de calor pode ser considerada sazonal, variando de acordo com as estações seca e chuvosa.

Considera-se que, políticas públicas de gestão do uso e ocupação da terra e ordenamento do território, que tenham como objetivo o crescimento urbano planejado são necessárias, para que os efeitos das modificações do uso e ocupação da terra e suas interferências na alteração da temperatura de superfície não sejam potencializados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. J. P.; GUIMARÃES JUNIOR, S. A. M.; ANDRADE, E. L.; FERREIRA NETO, J. V. **Relação entre o Índice de Vegetação e a Temperatura de Superfície na estimativa e identificação das ilhas de calor na cidade de Maceió-AL**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, Brasil, INPE, p. 2047-2054, 2015.

ANDRADE, S. C. P.; CORRÊA, J. A. J. Estimativa do saldo de radiação instantâneo à superfície para a cidade de Santarém-PA, através de imagens do Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, 653-661, 2014.

AL-AWADHI, J. M.; OMAR, S. A.; MISAK, R. F. Land degradation indicators in Kuwait. **Land Degradation & Development**. v. 16, n. 2, p. 163-176, 2005.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, LS.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56**. Rome, p. 297, 1998.

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI M. **Surface energy balance algorithms for land. Advance training and user's manual, version 1.0**, p. 98, 2002.

AMISSAH-ARTHUR , A.; MOUGENOT, B.; LOIREAU, M. Assessing farmland dynamics and land degradation on Sahelian landscapes using remotely sensed and socioeconomic data. **International Journal of Geographical Information Science**. v. 14, n. 6, p. 583-599, 2000.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; SANT'ANA NETO, J. L. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). **Confins - Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 7, n. 2, 2009.

ARANTES, A.E.; SOUSA, S.B.; SOARES, G.S.C.; FERREIRA, L.G. **Análise da temperatura da superfície terrestre e índice de vegetação SAVI para o município de Goiânia**, 2009. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil, INPE, p. 0834-0841, 2013.

ASCE-EWRI. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**, ASCE, 2005.

ASHBY, M. Modelling the water and energy balances of Amazonian rainforest and pasture using Anglo-Brazilian Amazonian climate observation data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, n. 2, p. 79-101, 1999.

ASSIS, E. S. **A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória**. Anais do Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Maceió. ANTAC, p. 92-101, 2005.

BARBIRATO, G. M; SOUZA, L. C. L. ; TORRES, S. C. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. Maceió, EDUFAL, 2007.

BARBOSA, H. A.; SILVA JÚNIOR, I. W.. **Variabilidade temporal do índice de vegetação NDVI e sua conexão com o clima: Bioma Caatinga Brasileira Savana Africana**. Anais XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, 2010.

BARBOSA, R. V.; VECCHIA, F. A. S. Estudos de ilha de calor urbana por meio de imagens do Landsat 7 ETM+: Estudo de caso em São Carlos (SP). **Revista Minerva**, v. 6, n. 3, p. 273-278, 2009.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain**. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean Climates. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands. 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin. Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1, p. 87-100, 2000.

BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; LAWRENCE, W. T. **Monitoramento da cobertura florestal através de índices de vegetação do NOAA-AVHRR**, Anais VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil, INPE, p. 030-037, 1993.

BERTOLO, S. L.; ROCHA, J. V.; YOUNG, A. F. **Evolução temporal do índice de vegetação da área urbana de Curitiba**. PR. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p. 2051-2058.

BEZERRA, D. D. S. **O Ecossistema Manguezal em Meio Urbano no Contexto de Políticas Públicas de Uso e Ocupação do Solo na Bacia do Rio Anil, São Luis, Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente), Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2008.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 1, p. 73–84, 2014.

BRANDÃO, A. M. P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas**, Programa de Pós-graduação em Geografia Física. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996.

BRANDÃO, A. M. P. M. A ilha de calor de outono na cidade do Rio de Janeiro: configuração em situações sinóticas contrastantes. In: SANT'ANNA NETO, J. A.; ZAVATINI, J. A. (orgs.): **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá. Universidade Estadual de Maringá, p. 193–210, 2001.

BUERMANN, W.; WANG, Y.; DONG, J.; ZHOU, L.; ZENG, X.; DICKINSON, R. E.; POTTER, C. S. Y MYNENI, R. B. Analysis of a multiyear global vegetation leaf area index data set. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 22, p. 14-16, 2002.

CALLEJAS I. J.; DURANTE L. C.; ROSSETI K. A. C. Contribuição da Pavimentação Asfáltica para o Aquecimento de Áreas Urbanas. **Engineering and Science**, v. 3, n.1, p. 64-72, 2015.

CANAVESI, V.; COURA, S. D. C.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; QUIRINO, V. F. **Dinâmica espectro-temporal MODIS em região de Cerrados e intenso uso agropecuário**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p. 1435-1442, 2005.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.; BARSİ, J. A. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 3, p. 490-494, 2007.

COELHO, A. L. N.; CORREA. W. S. C. Temperatura de superfície celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.7, n.1, p. 31-45, 2013.

COELHO, A. L. N. **Imagens Landsat-8/TIRS/OLI e Aster/GDEM aplicadas na avaliação do comportamento termal de superfície, usos e topografia**. Anais IXXVI Congresso Brasileiro de Cartografia e V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2014, Gramado/RS. XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia e V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2014.

COLTRI, P. 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**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.

CONCEIÇÃO, L. A. B. S. **Diagnóstico ambiental através do uso de técnicas de sensoriamento remoto como apoio para o planejamento de unidades administrativas: o caso de Osório, RS**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

CORDEIRO, E. C.; DINIZ, J. Região Metropolitana da Grande São Luís: Sua(s) Constituição(ões) e atuais dilemas para gestão intergovernamental. **Ciências Humanas em Revista**, v.7, n.2, São Luis/MA, 2009.

COSTA, D. F.; SILVA, H. R.; PERES, L. F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP através da utilização de geotecnologias. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 974-985, 2010.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 2ªed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 337-379.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e IVAS no município de Santa Cruz do Rio Pardo - SP usando imagens Landsat-5. **Ra'e ga**, v. 21, n 1, p. 234-271, 2011.

DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.4, p.385–392, 2008.

EMBRAPA. Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao_landsat.php . Acesso em: 22 de setembro 2015.

EL-ROBRINI, M.; MARQUES, R. V.; SILVA, M. A. M. A.; EL-ROBRINI, M. H. S.; FEITOSA, A. C.; TAROUCO, J. E. F.; SANTOS, J. H. S. VIANA, J. R. **Erosão e progradação do litoral brasileiro: Maranhão**. In: MUEHE, D. (Org.). Erosão e progradação do litoral brasileiro. 1. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v. 1, p. 87-130, 2006.

EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics**. 2008a. Disponível em: <<http://www2.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>. Acesso em: 03 de julho de 2015.

EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Cool Pavements**. 2008b. Disponível em: <<http://www2.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>. Acesso em: 03 de julho de 2015.

EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Green Roofs**. 2008c. Disponível em: <<http://www2.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>>. Acesso em: 03 de julho de 2015.

FARIA, S. D.; ELMIRO, M. A. T.; FERNANDES, D. H. F.; RODRIGUES, E. L. **Avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na Sub-bacia do Vale do Rio Itapecerica, Alto São Francisco, em Minas Gerais**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil, INPE, p.1472-1479, 2013.

FEITOSA, A. C. **Evolução Morfogenética do Litoral Norte da Ilha do Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Geografia) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1989.

_____. **Dinâmica dos processos geomorfológicos na área costeira a nordeste da Ilha do Maranhão**. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1996.

FEITOSA, S. M. R.; GOMES, J. M. A.; MOITA NETO, J. M.; ANDRADE, C. S. P. Consequências da urbanização na vegetação e na temperatura da superfície de Teresina, Piauí. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 6, n. 2, p. 58-75, 2011.

FIALHO, E. S. **Ilha de Calor em cidade de pequeno porte: Um caso de Viçosa, Zona da Mata Mineira**. São Paulo. Tese (Doutorado em Geografia/Geografia Física) – Universidade de São Paulo, 2009, 259 p.

FIALHO, E. S. Ilha de Calor: Reflexões acerca de um Conceito. **Acta Geográfica**, Edição Especial “Climatologia Geográfica”. p. 61-76, 2012. doi. 10.5654/actageo2012.0002.0004.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf Acesso em: 12 de novembro de 2015

FITZ, P. R. **Cartografia básica**. São Paulo. Ed. Oficina de Textos, 2008a.

_____. **Geoprocessamento Sem Complicação**. São Paulo. Ed. Oficina de Textos, 2008b.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

_____. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. Oficina de textos: São Paulo-SP, 2011.

GAMARRA, N. L. R; CORREA, M. P.; TARGINO, A. C. L. Utilização de sensoriamento remoto em análises de albedo e temperatura de superfície em Londrina - PR: contribuições para estudos de ilha de calor urbana. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 537-550, 2014.

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

GILABERT, M. A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; GARCÍA HARO, J. Acerca de los índices de vegetación. **Revista de Teledetección**, v. 8, n. 1, p. 1 - 10 1997.

Grass GIS. Bringing advanced geospatial technologies to the world. Disponível em: <<http://grass.osgeo.org/grass70/manuals/i.landsat.toar.html>>. Acesso em: 15 de julho de 2015.

GRIMMOND, C. S. B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 10, n. 1, p. 3-22, 2006.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário geológico e geomorfológico**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

HONORATO, A. F. A.; ANDRADE, V. S. A. Ilhas de calor e frescor na área urbana da cidade de Aquidauana-MS. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.2, n.4, p.878 – 886, 2012.

HUETE, A. R. **A soil-adjusted vegetation index**. **Remote Sensing of Environment**. v. 25, p. 295-309, 1988.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA - Sistema IBGE de recuperação automática. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>> Acesso em 20/12/2015.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Academic Press, New York, pg. 223, 1983.

IMESC (Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos). **Situação Ambiental da Ilha do Maranhão**. São Luís, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, University Press, p. 881, 2001

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php> Acesso em: 19 setembro de 2015.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; CHEN, J.; CHEN, Y. LI, J.; YAN, G.; ZHANG, X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, n. 3, p. 366–378, 2006.

JORDÃO FILHO, R. D. S.; OLIVEIRA, T. S. M. Planejamento e sustentabilidade urbana. **Caderno Organização Sistêmica**, v. 3, n. 2, p. 53-65, 2013.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; VERHOEF, W. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 43-55, 2006.

LEITE, M. R.; BRITO, J. L. S. Avaliação de Desempenho entre modelos de obtenção de temperatura de superfície por sensores remotos. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 4, n. 12, p. 73-89, 2012.

_____. Sensoriamento remoto aplicado à análise temporal da relação uso da terra/temperatura e albedo de superfície na bacia do rio vieira no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, n. 8, p. 98-120, 2012b.

LEIVAS, J.; GUSSO, A.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. **Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do sensor ASTER**. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 255-262, 2013.

LI, H.; PENG, H.; WU, Y.; NIE, J.; GU, Y. Study on urban heat island of Lianyungang based on remote sensing. **Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II**, v. 8181, n. 59, p. 1 -6, 2011.

LIMA, M. D. V.; RONCAGLIO, C. Degradação socioambiental urbana, políticas públicas e cidadania. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 3, n. 1, p. 53-63, 2001.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985, p. 244.

_____. O uso de geotecnologias na análise das mudanças climáticas na Metrópole de São Paulo. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, n. 47, p. 1-19, 2011.

LOPES, A. O sobreaquecimento das cidades. Causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa. **Territorium**, v. 15, n. 1, p. 39-52, 2009.

LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles: o exemplo de São Paulo e Lisboa. In: ORTIGOZA, S. A. G. **Da produção ao consumo: impactos socioambientais no espaço urbano**. São Paulo: Cultura Acadêmica. p. 111-146, 2009.

LOPES, H. L.; CANDEIAS, A. L. B.; ACCIOLY, L. J. O.; SOBRAL, M. DO C. M.; PACHECO, A. P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1210-1219, 2010.

LUCENA, A. J. de. Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. **Revista Continentes**, v. 1, n. 2, p. 8-27, 2013.

LUNET, N.; SEVERO, M.; BARROS, H. Desvio Padrão ou Erro Padrão. **Arquivos de Medicina**, v. 20, n. 1, p. 55- 59, 2006.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MARTINS, L. A. **A temperatura do ar em Juiz de Fora–MG: Influências do sítio e da estrutura urbana**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 1996.

MASULLO, Y. A. G. Uso e ocupação do solo e alterações climáticas na ilha do Maranhão. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 5, p. 663-674, 2012.

MACHADO, C. C. C. **Alterações na superfície do Parque Nacional do Catimbau (PE-Brasil): consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do bioma Caatinga**. Tese (Doutorado em Geografia), Departamento de Ciências Geográficas, UFPE, Recife, 2014.

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**. Tese (Doutorado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências humanas. Programa de Pós–Graduação em Geografia Física, USP, 322f, 1994.

MENEGUZZO, I. S. **Análise da degradação ambiental na área urbana da bacia do Arroio Gertrudes, Ponta Grossa, PR: uma contribuição ao planejamento ambiental**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2006.

MENESES, P. R; ALMEIDA T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, 2012.

MESSIAS, C.G. Análise de uso do solo utilizando diferentes técnicas e imagens de média e alta resolução espacial. **Revista de Geografia**, v. 2, n. 1, p. 9, 2012.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. Série Teses e Monografias, nº25. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1976.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F (Orgs). **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. INPE, São José dos Campos, 2002.

MOREIRA, A. M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias e aplicação**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p. 307, 2005.

MOREIRA, E. B. M.; NÓBREGA, R. S.; SILVA, B. B. Estimativa do saldo de radiação instantâneo na cidade do Recife, através de Imagens do Satélite Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 3, p. 589-601, 2011.

MOREIRA, E. B. M. **Balanco de energia e evapotranspiração na cidade do Recife-PE por sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Geografia), Departamento de Ciências Geográficas, UFPE, Recife, 2014.

MOREIRA, M. A.; BARROS, M. A.; FARIA, T. G. C.; ADAMI, M. Tecnologia de informação: imagens de satélite para o mapeamento de áreas de café de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 241, p. 16-26, 2007.

NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. Análise da evolução do fenômeno de Ilhas de calor no município de Goiânia/Go (1986-2010). **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 113-127, 2011.

NOVO, E. M. L. M, **Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações**. 4. Ed. Edgard Blucher, 1998.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L; ANTONIO, A. C. D; SILVA, B. B.; MACHADO, C. C.; GALVINCIO, J. D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1209-1217, 2012.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, n.4, p. 268–277, 1976.

_____. Boundary Layer Climates. in: **Technical Methuen**, p. 240. 1978.

_____. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, Oxford v.7, n.8, p.769-779, 1973.

_____. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observation. **Journal of climatology**, v.01, n. 03, p. 237-254, 1981.

_____. Surface climate processes. In: Bailey, W.G., Oke, T.R., Rouse, W.R. **The surface climates of Canada**. ed. McGill-Queen's University Press, capítulo 2, p. 400, 1997.

_____. The energy balance of central Mexico City during the dry season. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24, p. 3919-3930, 1999.

RANGEL, M. E. S. **Contribuição dos dados integrados dos sistemas sensores TM/Landsat-5 e ERS-1 SAR para o estudo de uso e cobertura da terra no nordeste da Ilha do Maranhão**. Dissertação. (Mestrado em Sensoriamento Remoto,) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. São José dos Campos, 2003.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora, MG: Ed. do Autor, 2000, 220 p..

RODRIGUES, E. L.; FERNANDES, D. H. F.; ELMIRO, M. A. T.; FARIA, S. D. **Avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na sub-bacia do Vale do Rio Itapecerica, Alto São Francisco, em Minas Gerais**. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, p. 1472-1479, 2013.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7a Edição. Ed. da Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

ROSEMBACK, R.; FRANÇA, A.A.S.; FLORENZANO, T.G. **Análise Comparativa dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS e TM/ Landsat 5 em uma área urbana**. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p. 1075-1082, 2005.

RUBIRA, F. G. Definição e diferenciação dos conceitos de áreas verdes/espços livres e degradação ambiental/impacto ambiental. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 45, p. 134-150, 2016.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço da energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Civil) – COPPE, 2005, 218p.

PARIZOTO, N. M. S. F.; CAMPOS, S.; RODRIGUES, M. T.; TRAFICANTE, D. P.; GARCIA, Y. M. **Influência da temperatura de superfície em diferentes setores da área urbana de Piratininga/SP por meio de dados orbitais**. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia e V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2014, Gramado/RS. XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia e V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2014.

PIVETA, M. Ilhas de calor na Amazônia. **Pesquisa Fapesp**, v. 200, p. 78-81, 2012.

POLIZEL, J. L. **Geotecnologias e Clima Urbano: aplicação dos recursos de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na cidade de Piracicaba**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007.

ROMERO, M. A. B. Desenho da Cidade e Conforto Ambiental. **Revista de Urbanismo e Arquitetura**, v.7, n. 1, p. 12-19, 2006.

ROSENTHAL, J.K; CRAUDERUEFF, R; CARTER, M. Urban Heat Island Mitigation Can Improve New York City's Environment: Research on the Impacts of Mitigation Strategies on the Urban Environment. **Sustainable South Bronx Working Paper**, 2008.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Third ERTS Symposium**, NASA , v. 1, p 309-317, 1974.

SABIN, G. P.; SOUZA, A. M.; BREITKREITZ, M. C.; POPPI, R. J. Desenvolvimento de um algoritmo para identificação e correção de *spikes* em espectroscopia Raman de imagem. **Química Nova**, v. 35, n.3, p. 612-615, 2012.

SANTOS, C. A. C.; LIMA, J. R. A. Análise dos Efeitos da Expansão Urbana de Manaus-AM Sobre Parâmetros Ambientais Através de Imagens de Satélite. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2013.

SANTOS, M. **Manual de Geografia Urbana**. São Paulo: Hucitec, 1981, 203p.

SANTOS, J. H. S. dos. **Análise por geoprocessamento da ocupação na franja costeira ao norte da cidade de São Luís – MA**. Rio de Janeiro: IGEO/PPGG/UFRJ, 1996. 149 p. (Dissertação de Mestrado)

SANTOS, T. O. **Identificação de ilhas de calor em recife-pe por meio de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, 2011.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. **Estimativa de parâmetros biofísicos em diferentes tipos de uso e ocupação do solo no semiárido paraibano**. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia e V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2014, Gramado/RS. XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia e V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2014.

SILVA, B. B.; MENDONÇA, R. R. O.; SILVA, S. T. A.; FERREIRA, R. C. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM - Landsat 5. **Revista de Geografia**, v. 25, n. 2, p. 24-41, 2008.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. P.; JUNIOR, B. B.; RICCE, W. D. S; PACHECO, A. P. Balanço de radiação em áreas do cerrado brasileiro por sensoriamento remoto. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 29, n. 2, p. 119-126, 2014.

SOUSA, C. J. S.; COSTA, K. S. P; MARTINS, B. M; NOGUEIRA, M. M. **Análise espaço temporal da urbanização na Ilha do Maranhão através da subtração de imagens multitemporais de sensoriamento remoto**. Anais XIII do Simpósio Brasileiro de geografia Física Aplicada, 13, Viçosa, 2009.

SOUZA, J. F. **Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa-PB**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Urbana e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2014.

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

TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the large scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3, p. 477-490, 2009.

TRENTIN, C. B. **Análise da resposta espectral da vegetação da área de proteção ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima.** (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2011.

USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). **How do Landsat 8 band combinations differ from Landsat 7 or Landsat 5 satellite.** 2013. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/L8_band_combos.php> 2013. Acesso em: 19 setembro de 2015.

USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). **What are the best spectral bands to use for my study?** 2015a. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/best_spectral_bands_to_use.php>. Acesso em: 19 setembro de 2015.

USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). **Using the USGS Landsat 8 Product.** 2015b. <Disponível em: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php>. Acesso em: 30 janeiro de 2016.

BATISTA, W. R. M.; NETO, A. O. A.; SILVA, E.; SOUZA, A. O.; VASCO, N. A. Determinação do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré, Sergipe. **Scientia Plena**, v. 9, n. 4, p. 1-10, 2013.

VELÁZQUEZ, A.; DURÁN, E.; RAMÍRES, I. MAS, J. F.; BOCCO, G.; RAMÍRES, G.; PALACIO, J. L. Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. **Global Environmental Change**, v. 13, n. 3, p. 175-184, 2003.

WANG H.; ZHOU, X.; WAN, C.; FU, H.; ZHANG, F.; REN, J. Eco-environmental degradation in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and comprehensive ecological protection planning. **Environmental Geology**, v. 55, n. 5, p. 1135-1147, 2007.

WARREN, A. Land degradation is contextual. **Land degradation & Development**, v. 13, n.6, p. 449-459, 2002.

WENG, Q.; LU, D. A. Sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, n. 1, p. 68-83, 2008.

XIONG, Y.; HUANG, S.; CHEN, F.; YE, H.; WANG, C.; ZHU, C. The Impacts of Rapid Urbanization on the Thermal Environment: A Remote Sensing Study of Guangzhou, South China. **Remote Sensing**, v. 4, n. 7, p. 2033-2056, 2012.