

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO FÍSICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**EFEITO DA URBANIZAÇÃO NO BALANÇO DE  
ENERGIA DA SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO  
REMOTO EM VÁRZEA GRANDE - MT**

**FLÁVIA REGINA PEREIRA SANTOS DE SIQUEIRA**

**PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> NADJA GOMES MACHADO**  
**Orientadora**

**PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES**  
**Coorientador**

**Cuiabá, MT**  
**Junho de 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO FÍSICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**EFEITO DA URBANIZAÇÃO NO BALANÇO DE  
ENERGIA DA SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO  
REMOTO EM VÁRZEA GRANDE - MT**

**FLÁVIA REGINA PEREIRA SANTOS DE SIQUEIRA**

*Tese apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Física Ambiental  
da Universidade Federal de Mato  
Grosso, como parte dos requisitos para  
obtenção de título de Doutora em Física  
Ambiental.*

**PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> NADJA GOMES MACHADO**  
**Orientadora**

**PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES**  
**Coorientador**

**Cuiabá, MT**  
**Junho de 2019**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

P436e Pereira Santos de Siqueira, Flávia Regina.  
EFEITO DA URBANIZAÇÃO NO BALANÇO DE ENERGIA DA  
SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO REMOTO EM VÁRZEA GRANDE - MT /  
Flávia Regina Pereira Santos de Siqueira. -- 2019  
79 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientadora: Nadja Gomes Machado.  
Co-orientador: Marcelo Sacardi Biudes.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,  
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2019.  
Inclui bibliografia.

1. Dados detectados remotamente. 2. Algoritmos baseados em pixels. 3.  
Superfícies impermeáveis. 4. Mapeamento urbano. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: EFEITO DA URBANIZAÇÃO NO BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO REMOTO EM VÁRZEA GRANDE - MT**

**AUTORA: FLÁVIA REGINA PEREIRA SANTOS DE SIQUEIRA**

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 10 de junho de 2019, pela comissão julgadora:



**Profa. Dra. Nadja Gomes Machado**  
**Orientadora**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
de Mato Grosso – IFMT



**Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes**  
**Coorientador**

Instituto de Física - UFMT



**Prof. Dr. Victor Hugo de Moraes Danelichen**  
**Examinador Externo**

Universidade de Cuiabá - UNIC



**Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado**  
**Examinador Interno**

Instituto de Física - UFMT



**Prof. Dr. Carlos Alexandre Santos Querino**  
**Examinador Externo**

Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA) – UFAM

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu filho e meu marido, sem vocês nenhuma conquista valeria a pena.

Aos meus pais que me ensinaram o caminho da honestidade e persistência.

Quero dizer que essa conquista não é só minha, é nossa.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por me permitir ter uma vida repleta pessoas e oportunidades tão maravilhosas.

À minha família pelo estímulo aos estudos e paciência nos momentos difíceis.

Agradeço também ao meu marido, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades. Quero agradecer também ao meu filho, “coisa mais linda” da minha vida que iluminou meus dias de maneira especial.

Aos meus orientadores, professora Nadja Gomes Machado e Marcelo Sacardi Biudes. Obrigada pela oportunidade de ser orientada de vocês! Tenho muito orgulho de citá-los como responsáveis pela minha formação profissional. Agradeço pela confiança.

Aos membros da banca examinadora pelos comentários e sugestões apresentados que possibilitaram melhorias na tese.

Aos amigos do PGFA, em especial à Juliana Chegury e Pablinne Batista.

Aos docentes do PGFA pelo incentivo nas atividades e oportunidade de convívio. Em especial ao coordenador do programa professor Dr. José de Souza Nogueira (Paraná). Pela receptividade a minha pessoa quando me apresentei e pela sua presença de espírito em seu trabalho na coordenação do programa de pós-graduação.

Aos técnicos do PGFA, em especial à Soilce Carrilho e Cezário Gonçalves pela solicitude, prontidão e suporte administrativo.

À Universidade Federal de Mato Grosso e todos os profissionais envolvidos, que proporcionaram meu aprendizado da graduação ao doutorado. Onde desde 2007 estou na instituição com discente.

À Faculdade de Engenharia, campus Várzea Grande da UFMT, onde desde 2014 estou como docente. Tenho muito orgulho de ser professora e aluna nesta instituição.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	v
RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. HIPÓTESE .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>3</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. URBANIZAÇÃO DE CIDADES MÉDIAS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. HISTÓRIA DE VÁRZEA GRANDE.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESPAÇO URBANO</b>	<b>7</b>
<b>2.4. BALANÇO DE ENERGIA DE SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO</b>	<b>8</b>
<b>REMOTO</b>	<b>8</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.1. Zoneamento Urbano de Várzea Grande .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2. DADOS DE SENSORES ORBITAIS .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3. DADOS METEOROLÓGICOS .....</b>	<b>14</b>
<b>3.4. ÍNDICES ESPECTRAIS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.5. CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DO SOLO .....</b>	<b>16</b>

<b>3.6. ALGORITMO SEBAL.....</b>	<b>16</b>
<b>3.6.1. Fluxo de calor sensível.....</b>	<b>18</b>
<b>3.6.2. Estimativa do fluxo de calor latente e evapotranspiração .....</b>	<b>20</b>
<b>3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....</b>	<b>21</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1. PLUVIOSIDADE E TEMPERATURA.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2. CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3. DINÂMICA DO NDVI, ALBEDO E TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE .....</b>	<b>30</b>
<b>4.4. FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA SUPERFÍCIE.....</b>	<b>33</b>
<b>4.5. ANÁLISE DO PERFIL ESPACIAL.....</b>	<b>36</b>
<b>4.6. CONVERSÃO DA COBERTURA DO SOLO.....</b>	<b>41</b>
<b>5. DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1. CLIMATOLOGIA LOCAL .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2. CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3. DINÂMICA DO NDVI, ALBEDO E TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE .....</b>	<b>46</b>
<b>5.4. FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA SUPERFÍCIE.....</b>	<b>47</b>
<b>5.5. EFEITO DA CONVERSÃO DA COBERTURA DO SOLO.....</b>	<b>49</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>7. SUGESTÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização da área de estudo, perfis (N-S, Norte-Sul e W-E, Oeste-Leste) e zoneamento da área urbana do município de Várzea Grande, Mato Grosso - Brasil. Imagem de satélite Landsat 5 do ano de 2011, composição falsa cor (RGB 543).....	11
<b>Figura 2</b> - Fluxograma representando os procedimentos para estimativa do saldo de radiação ( $Rn_{ins}$ , imagem Landsat 5). .....	17
<b>Figura 3</b> - Fluxograma representando os procedimentos para estimativa da evapotranspiração a partir do fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H) e o saldo de radiação ( $Rn$ ).....	20
<b>Figura 4</b> - Normal climatológica (1981-2010) e médias mensais de precipitação e temperatura média do ar nos anos de 1986 e 2011 para Várzea Grande – MT. ....	24
<b>Figura 5</b> - Distribuição espacial das classes de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. Classes indicadas FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água).....	27
<b>Figura 6</b> - Distribuição espacial somente das classes de floresta (FOR, em A) e construída (BUP, em B) para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. FOR (floresta); BUP (construções). .....	28
<b>Figura 7</b> - Distribuição espacial do NDVI (A), albedo (B) e LST (C) para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água). NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície). .....	32
<b>Figura 8</b> - Distribuição espacial $Rn_{inst}$ (saldo de radiação, em A), H (fluxo de calor sensível em B), $Le$ (fluxo de calor latente, em C) e $ET_{24}$ (evapotranspiração diária, em D) para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.....	35
<b>Figura 9</b> - Perfil N-S (Norte-sul) para as variáveis NDVI, albedo, LST, $Rn_{inst}$ , H, $Le$ e $ET_{24}$ para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. Md.Mov. (média móvel); NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície); $Rn_{inst}$ (saldo de radiação instantâneo), H (fluxo de calor sensível), $Le$ (fluxo de calor latente) e $ET_{24}$ (evapotranspiração diária); ZAP (Zona proteção do aeroporto); ZCE (Zona central); ZAV (Zona de áreas verdes). ZEX (Zona expansão urbana); ZRE (Zona residencial); ZIN (Zona Industrial); ZUM (Zona uso misto). .....	37

**Figura 10** - Perfil W-E (Oeste-leste) para as variáveis NDVI, albedo, LST,  $R_{n_{inst}}$ , H, Le e  $ET_{24}$  para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. Md.Mov. (média móvel); NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície);  $R_{n_{inst}}$  (saldo de radiação instantâneo), H (fluxo de calor sensível), Le (fluxo de calor latente) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária); ZAP (Zona proteção do aeroporto); ZCE (Zona central); ZAV (Zona de áreas verdes). ZEX (Zona expansão urbana); ZRE (Zona residencial); ZIN (Zona Industrial); ZUM (Zona uso misto). ..... 39

**Figura 11** - Correlograma composto dos gráfico de dispersão, histogramas e coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis: NDVI, albedo, LST,  $R_{n_{inst}}$ , H, Le e  $ET_{24}$  para Várzea Grande/MT com os dados de 1986 e 2011. NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície);  $R_{n_{inst}}$  (saldo de radiação instantâneo), H (fluxo de calor sensível), Le (fluxo de calor latente) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária). ..... 41

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> População de Várzea Grande no período de 1970 a 2010.....	6
<b>Tabela 2</b> - Nomenclatura e descrição das zonas da área urbana de Várzea Grande.	12
<b>Tabela 3</b> - Dados das imagens de satélite utilizadas e dados meteorológicos correspondentes (Dados da estação automática do INMET - Cuiabá). .....	15
<b>Tabela 4</b> - Medidas de precisão para avaliar o desempenho preditivo da classificação. Onde a são os verdadeiros positivos, b os falsos positivos, c os falso-negativos, d os verdadeiros negativos (ou ausências) e n (= a + b + c + d) é o número total de locais. ....	21
<b>Tabela 5</b> - Regras e condições definidas para gerar a classificação de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. ....	25
<b>Tabela 6</b> - Medidas de precisão da classificação de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. ....	26
<b>Tabela 7</b> - Dimensionamento das áreas de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. ....	27
<b>Tabela 8</b> - Dados do resultado da conversão das classes de cobertura do solo no período para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.....	28
<b>Tabela 9</b> - Dimensão das classes de cobertura do solo por zona para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. ....	29
<b>Tabela 10</b> - Intervalo de confiança das variáveis para média a 95% de cada uma das zonas da área urbana para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.....	30
<b>Tabela 11</b> - Média (intervalo de confiança a 95%) das variáveis $Rn_{inst}$ , H, Le e $ET_{24}$ de cada uma das classes de cobertura do solo da área urbana de Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. ....	33
<b>Tabela 12</b> - Conversão de cada classe de 1986 para 2011 em Várzea Grande. Obtido de amostra de 50 pontos aleatório extraídos para ambos os anos. ....	41
<b>Tabela 13</b> - Intervalo de confiança para média a 95% de 50 pontos originais de cada classe em 1986 e o efeito a conversão nas médias das variáveis NDVI, Albedo e Temperatura de superfície (LST) em 2011. ....	42
<b>Tabela 14</b> - Intervalo de confiança para média a 95% de 50 pontos originais de cada classe em 1986 e o efeito a conversão nas médias das variáveis saldo de radiação	

( $R_{inst}$ ), fluxos de calor sensível (H), latente (Le) e evapotranspiração diária (ET) em $W.m^{-2}$ .....	42
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\epsilon_{atm}$	Emissividade da atmosfera
$\epsilon_{sup}$	Emissividade da superfície para banda termal
$Z_{om}$	Coefficiente de rugosidade ao transporte de momento
$Z_{ome}$	Coefficiente de rugosidade ao transporte de momento próximo da estação
BAR	Classe de cobertura do solo com solo exposto
BUP	Classe de cobertura do solo com construções
$c_p$	Calor específico do ar a pressão constante
dT	Gradiente de temperatura
ESPA	Centro de ciência da arquitetura e processamento
ET	Evapotranspiração diária
FE <sub>24h</sub>	Fração evaporativa diária
FE <sub>i</sub>	Fração evaporativa instantânea
FOR	Classe de cobertura do solo com vegetação arbórea
G	Densidade de fluxo de calor no solo
H	Densidade de fluxo de calor sensível
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K	Unidade de temperatura Kelvin
$k$	Constante de von Karman
Landsat	Programa de satélites para observação da Terra
LC	Área do tipo de cobertura do solo
LCC	Mudança da cobertura do solo
Le	Densidade de fluxo de calor latente
LT5	Landsat 5
METRIC	Mapeamento da evapotranspiração com calibração internalizada
MNDWI	Índice de água por diferença normalizada modificado
NDBAI	Índice de aridez por diferença normalizada
NDBI	Índice de construções por diferença normalizada
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
NDWI	Índice de água por diferença normalizada

$r$	Correlação de Spearman
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície
$R_{n24h}$	Saldo de Radiação diário
$R_{n_{inst}}$	Saldo de Radiação instantâneo
$R_{s\downarrow}$	Radiação de onda curta incidente medida
$R_{s,b}$	Irradiância solar espectral
$R_{s24h}$	radiação solar média de incidência diária
SAVI	Índice de vegetação ajustado ao solo
SEBAL	Algoritmo de balanço de energia de superfície
SEBS	Sistema de balanço de energia de superfície
SHR	Classe de cobertura do solo com vegetação arbustiva e/ou gramíneas
SR	Sensoriamento remoto
S-SEBI	Índice de balanço de energia de superfície simplificado
$T_{atm}$	Temperatura atmosférica em Kelvin
TIRS	Sensor infravermelho termal
TM	Mapeador temático
TOA	Topo da atmosfera
$T_{sup}$	Temperatura da superfície
$u^*$	Velocidade de fricção
$u_{200}$	Velocidade do vento na altura de 200 metros
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
$UR_{med}$	Umidade relativa do ar medida
USGS	Pesquisa Geológica dos Estados Unidos
$w$	Concentração de vapor d'água
WAT	Classe de cobertura do solo com corpos d'agua
WGS	Sistema Geodésico Mundial
$z$	Altura
ZAP	Zona de proteção do aeroporto
ZAV	Zona de áreas verdes
ZCE	Zona central

ZEX	Zona expansão urbana
ZIN	Zona de uso industrial
ZRE	Zona de uso residencial
ZUM	Zona de uso misto
$\alpha_{\text{sup}}$	Albedo da superfície parametrizado para o Landsat-8
$\alpha_{\text{toa}}$	Albedo do topo da atmosfera
$\lambda$	Comprimento de onda efetivo da banda
$\lambda_v$	Calor latente de vaporização
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$\rho$	Refletância da superfície
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman
$\tau_{24\text{h}}$	Transmissividade diária da atmosfera para onde curta

## RESUMO

SIQUEIRA, F. R. P. S. **Efeito da urbanização no balanço de energia da superfície por sensoriamento remoto em Várzea Grande – MT.** Cuiabá, 2019, 79f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física. Universidade Federal de Mato Grosso.

A distribuição espacial e temporal da cobertura do solo de uma localidade são fundamentais para entender as mudanças ambientais ocorridas no processo de urbanização. Estas alterações podem ser quantificadas e analisadas com o uso do sensoriamento remoto. Várzea Grande no Estado de Mato Grosso, Brasil é uma cidade que experimentou elevado crescimento nas últimas décadas, mas se enquadra como uma metrópole. Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da urbanização sobre o comportamento espectral e particionamento de energia utilizando de imagens do satélite Landsat 5 TM em área urbana de médio porte. O estudo foi realizado para as datas 1986 e 2011 na área urbana de Várzea Grande, local com característica de baixa densidade de urbanização. Primeiro foi realizada a classificação de cobertura do solo com um algoritmo gerado com índices biofísicos. Foi realizada a estimativa da temperatura de superfície, cálculo do NDVI, albedo e com o algoritmo SEBAL foi estimado o balanço de energia. A classificação de cobertura do solo permitiu discernir cinco classes para a área urbana de Várzea Grande: vegetação densa; vegetação rasteira e/ou arbustiva; solo exposto; construções e água. A classificação apresentou alto coeficiente de concordância, Kappa, com valores acima de 0,76. No período analisado a área coberta pela classe relacionada à construções cresceu 600% e as áreas de floresta densa decresceram 85%. Quando comparados os dados que passaram por conversão de cobertura, houve aumento do NDVI e os valores de temperatura de superfície apresentaram variação acima de 10 °C. Houve aumento das médias de calor sensível e decréscimo em saldo de radiação, fluxo de calor latente e evapotranspiração. Portanto, no período de 1986 a 2011 a urbanização modificou a estrutura do ambiente superficial e o comportamento espectral da superfície desta cidade. Foi verificado que mesmo com condições pluviométricas favoráveis para a vegetação, o fluxo de calor sensível aumentou e houve queda do fluxo de calor latente. Concluiu-se que a cidade de Várzea Grande passou por grandes alterações na cobertura do solo, o que alterou principalmente o particionamento energético e a temperatura de superfície. Os dados obtidos puderam originar resultados que podem ser utilizados para o planejamento urbano em busca de promover melhorias no conforto térmico para a população.

**Palavras-chave:** Dados detectados remotamente; Algoritmos baseados em pixels; Superfícies impermeáveis; Mapeamento urbano;

## ABSTRACT

SIQUEIRA, F. R. P. S. **Effect of urbanization on the surface energy balance by remote sensing in Várzea Grande – MT.** Cuiabá, 2019, 79f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics) - Institute of Physics. Federal University of Mato Grosso.

Spatial and temporal distribution of the soil cover of a locality are fundamental to understand the environmental changes occurred in the process of urbanization. These changes can be quantified and analyzed using remote sensing. Várzea Grande in the state of Mato Grosso, Brazil is a city that has experienced high growth in the last decades, but it fits like a metropolis. This work aims to evaluate the effects of urbanization on spectral behavior and energy partitioning using Landsat 5 TM satellite images in a medium-sized urban area. The study was about Várzea Grande urban area 1986 and 2011, a place with a low density of urbanization. First, soil cover classification was performed with an algorithm generated with biophysical indexes. The surface temperature estimation, NDVI calculation, albedo and the SEBAL algorithm were used to estimate the energy balance. The classification of soil cover allowed to discern five classes for the urban area of Várzea Grande: dense vegetation; underbrush and / or shrub vegetation; exposed only; buildings and water. The classification had a high coefficient of agreement, Kappa, with values above 0.76. In the analyzed period, the area covered by the construction-related class grew by 600% and dense forest areas decreased by 85%. When comparing the data that underwent coverage conversion, there was an increase in NDVI and the surface temperature values showed a variation above 10 ° C. There was an increase in the means of sensible heat and decrease in the balance of radiation, latent heat flux and evapotranspiration. Therefore, from 1986 to 2011 urbanization modified the structure of the surface environment and the spectral behavior of the surface of this city. It was verified that even with favorable pluviometric conditions for the vegetation, the sensible heat flow increased and there was a decrease in the latent heat flux. It was concluded that the city of Várzea Grande underwent major changes in soil cover, which mainly altered the energy partitioning and surface temperature. The data obtained could lead to results that can be used for urban planning in order to promote improvements in thermal comfort for the population.

**Keywords:** Remotely sensed data; Pixel-based algorithms; Impervious surfaces; Urban mapping;

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. PROBLEMÁTICA

A urbanização e consequente alteração da cobertura do solo influenciam no comportamento espectral dos alvos na superfície terrestre. Com isto a avaliação do padrão espacial das mudanças ambientais causadas pela urbanização torna-se importante. A determinação da amplitude dessa mudança pode ser feita utilizando métodos indiretos de aquisição de dados, por exemplo, com o sensoriamento remoto (SHARMA et al., 2013).

Grande parte dos estudos voltados para efeitos ambientais da urbanização são focados em áreas urbana com grande população. Poucos estudos têm avaliado os efeitos da urbanização em áreas que não são de metrópoles. Como no caso das cidades de tamanho médio, entre 250 e 700 mil habitantes, regiões de cobertura heterogêneas com baixa densidade de urbanização quando comparado com metrópoles (DIAS et al. 2016).

Com o aumento da população nas cidades, a área urbana tende a se expandir e a vegetação nativa aos poucos é substituída por outras coberturas. Índices espectrais podem ser usados para classificar diferentes classes de cobertura do solo quando utilizados de forma integrada (CHEN et al., 2006). Além disso, os índices espectrais obtidos por SR podem auxiliar na das mudanças espectrais causadas pela urbanização.

Nas áreas urbanas as mudanças temporais de variáveis como temperatura ocorrem ao longo do tempo e do espaço. A análise da variação climática em área urbana é complicada pela não homogeneidade de cobertura do solo, ou seja, em poucos metros quadrados há a coexistência de mais de um tipo de cobertura (MIRANDA, 2011). O que torna as análises pontuais pouco expressivas para áreas urbanas.

Isto implica em utilizar uma metodologia que permita uma análise espacial adequada. Neste contexto o sensoriamento remoto se torna indispensável pela capacidade de captar a assinatura espectral para cada pixel de maneira individualizada. O SR tem sido usado em áreas urbanas para diversos fins, como avaliar ilhas de calor, classificações de cobertura do solo e como entrada para os modelos de trocas da atmosfera com superfície urbana (MARTIN et al. 2015, SHARMA et al. (2013), GOMES et al. 2013).

As consequências da urbanização no clima local atualmente são trabalhadas no mundo por pesquisadores da área de Ciências Ambientais (RIBEIRO et al. 2018; MARTIN et al. 2015, SILVA et al. 2018<sup>a</sup>; PAVÃO et al., 2016; SHARMA et al. 2013, GOMES et al. 2013). Nesse contexto, vários estudos passaram a focar em metodologias que utilizam índices espectrais, temperatura de superfície, balanço de energia e evapotranspiração são aplicados à diversos ambientes. Várzea Grande no estado de Mato Grosso, é uma cidade de médio porte que cresceu rapidamente nas últimas décadas (COX, 2008), mas ainda não se conhece os efeitos deste crescimento no clima urbano.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

Índices espectrais e cálculos através de algoritmos de balanço de energia são utilizados para avaliar mudanças provocadas na substituição da cobertura do solo. Como o algoritmo SEBAL, proposto por BASTIAANSEN (1995). Além disso, este trabalho é uma oportunidade de mostrar como ferramentas de baixo custo podem produzir mapas temáticos capazes de fornecer informações fundamentais para a gestão pública.

Várzea Grande pertence ao aglomerado urbano de Cuiabá, a capital do estado, entretanto estudos sobre o clima dessa cidade são quase inexistentes (COX, 2008). Várzea Grande foi alvo de poucos estudos climáticos focados na urbanização e seus efeitos. Assim, propor uma caracterização são importantes em vista dessa carência.

O presente estudo tem foco na área urbana do município de Várzea Grande, no estado de Mato Grosso (região centro-oeste do Brasil). Que atualmente possui a segunda maior população no estado (BRASIL, 2010) e se representa as cidades de porte médio do país com uma população em torno de 250 mil habitantes. As mudanças ocorridas na cobertura do solo ainda carecem de ser avaliadas no contexto de mudanças no comportamento espectral e fluxos de energia da superfície.

## **1.3. HIPÓTESE**

A conversão de floresta em construções diminui o NDVI, Rn, Le, ET e aumenta o albedo, LST e H no município de Várzea Grande, MT.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo Geral**

Avaliar os efeitos da urbanização sobre o comportamento espectral e o particionamento de energia em área urbana de médio porte utilizando de imagens do satélite Landsat 5 TM.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- I. Propor um algoritmo de classificação de cobertura do solo para o meio urbano utilizando índices espectrais.
- II. Identificar a dinâmica das alterações na cobertura do solo no período de 1986 a 2011.
- III. Avaliar o impacto das alterações de cobertura do solo no NDVI, albedo, temperatura de superfície, saldo de radiação, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e evapotranspiração.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. URBANIZAÇÃO DE CIDADES MÉDIAS**

O crescimento populacional gera impactos no meio ambiente, por exemplo, as mudanças de cobertura do solo. O conceito de cidades médias no Brasil considera o tamanho demográfico como critério para identificá-las. As cidades médias são as com população entre 250.000 e 700.000 habitantes (DIAS et al. 2016). Estas cidades, diferentemente das metrópoles, possuem uma estrutura urbana com maior presença de mistura entre áreas com construções com áreas verdes de pequeno porte.

As cidades médias apresentaram nos últimos anos crescimento anual do PIB e crescimento da população maior quando comparada às cidades com mais de 500 mil habitantes e das cidades de pequeno porte. MOTTA & MATA (2008) mostraram que as cidades médias cresceram em ritmo mais acelerado do que as metrópoles. Em 2017, mais da metade da população brasileira vivia em apenas 5,6% dos municípios (56,5% ou 117,2 milhões de habitantes), os que possuem mais de 100 mil habitantes (BRASIL, 2017).

Outros autores propuseram o nome “Cidades de Comando Regional” para as cidades médias, devido à situação social e econômica em que elas atualmente se inserem (LIMA & DA SILVEIRA, 2017). Várzea Grande, município do estado de Mato Grosso (região centro-oeste do Brasil), se encaixa nesta classe de cidades médias. A cidade atualmente possui a segunda maior população no estado e representa as cidades de porte médio do país, com uma população em torno de 250 mil habitantes (BRASIL, 2010).

### **2.2. HISTÓRIA DE VÁRZEA GRANDE**

Em 1867 o Brigadeiro José Vieira Couto de Magalhães fundou Várzea Grande na margem direita do Rio Cuiabá que, inicialmente, abrigou um acampamento militar estratégico na Guerra do Paraguai, seu fundador foi o Brigadeiro José Vieira Couto de Magalhães. Após o término da guerra, houve a fixação de moradia de remanescentes do conflito (soldados e paraguaios). Foi criado o distrito com o nome de Várzea Grande, pela Lei Estadual nº 145, de 08 de abril de 1896, no Município de Cuiabá (TAVARES, 2011).

Na década de 1940, o estado de Mato Grosso estava na rota da política expansionista chamada “Marcha para o Oeste”. Em 1942 foi construída a primeira ponte ligando à capital Cuiabá e em 1945 a instalação de luz elétrica em Várzea Grande. A construção da ponte, a primeira sobre o rio Cuiabá talvez tenha sido, a obra do Interventor Júlio Müller facilitou o acesso rodoviário de Cuiabá com as cidades do Norte do Estado de Mato Grosso (SANTOS, 2013).

Na época, Várzea Grande era chamada de “Portal da Amazônia” pelo fato de o migrante ter que passar por ela, quando ainda era um distrito de Cuiabá. Em 1948, o Distrito de Várzea Grande foi emancipado e um ano após a emancipação foi repassado ao Ministério da Aeronáutica a área para a construção do Aeroporto Marechal Rondon. Um dos fatores que contribuiu decisivamente para o aumento da população no município de Várzea Grande, foi a instalação do aeroporto em sua região (SANTOS, 2013).

Antes de 1960 a população urbana várzea-grandense estava mais concentrada nas proximidades do Aeroporto Marechal Rondon e do Rio Cuiabá, bem como nas imediações da Avenida da FEB e nos antigos povoados e vilas. Em 1969 o presidente Emílio Garrastazu Médici transferiu para Cuiabá a sede do 9º Batalhão de Engenharia e Construções do Exército Brasileiro (9º BEC), ao qual conferiu a missão de abrir a rodovia BR-163, as obras iniciaram em 1971 para interligar a capital mato-grossense à cidade de Santarém no Pará.

A abertura da rodovia permitiu a formação de uma malha urbana ao longo da rodovia no estado de Mato Grosso e o aumento populacional (VILARINHO NETO, 2009). Cuiabá e Várzea Grande se tornaram um ponto estratégico que atraiu imigrantes que chegavam de vários lugares do estado e do Brasil. A expansão do agronegócio em Mato Grosso contribuiu para o avanço da fronteira agrícola. Grande parte dos imigrantes vindos de outros estados da federação que tinham como destino as cidades loteadas por colonizadoras de terras acabavam fixando moradia em Cuiabá ou em Várzea Grande (OLIVEIRA, 2016).

Em seguida a mecanização da produção agrícola gerou o êxodo rural. Como consequência a população urbana de Cuiabá e Várzea Grande atingiu, respectivamente, de 85% e 77% do total da população dos respectivos municípios na década de 1970 (BRASIL, 1970). A partir dos anos de 1970 com a chegada de

imigrantes a urbanização de Várzea Grande se concretizou de maneira fragmentada dentro da área urbana do município (OLIVEIRA, 2016).

A população urbana passou a crescer mais com as políticas de desenvolvimento e ocupação do centro-oeste a partir da década de 1980. Neste período através de incentivos fiscais e doações de terras, indústrias se instalaram na região. Várzea Grande passou a receber população para constituir mão de obra no comércio e indústria ligada ao agronegócio (COX, 2008).

O crescimento populacional em um período muito curto provocou alterações no ambiente natural de forma significativa, causando prejuízos ao meio físico e a qualidade de vida das pessoas (GARCIA, 2010). Após o período de 1970 a 1980, o período de 1980-1990 foi o de maior crescimento populacional da cidade. Neste período houve a construção informal de habitações e problemas relativos à infraestrutura urbana. A ocupação informal e desordenada que originou um município com 60% das moradias classificadas sem infraestrutura urbana, como asfalto, calçadas pavimentadas, iluminação e rede de esgoto (BRASIL, 2010).

De 1990 até 2000 a população urbana local cresceu significativamente e neste período novos loteamentos surgiram (Tabela 1). Alguns dos loteamentos surgiram nos locais ainda não edificados dentre os loteamentos mais antigos e outros em áreas nos extremos norte e sul da área urbana. Mas o número de loteamentos aprovados pela prefeitura de Várzea Grande não acompanhou o crescimento populacional (OLIVEIRA, 2016).

**Tabela 1** População de Várzea Grande no período de 1970 a 2010.

População	Ano				
	1970	1980	1991	2000	2010
<b>URBANA</b>	13.908	73.294	155.307	211.303	248.704
<b>RURAL</b>	4.145	3.384	6.651	3.995	3.892
<b>TOTAL</b>	18.053	76.678	161.958	215.298	252.596

Dados dos Censos Demográficos 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010 (BRASIL, 2010; VÁRZEA GRANDE, 2007).

Em 2010 cerca de 84% da população vivia em áreas urbanas no Brasil e deste total a metade vivia em regiões metropolitanas (BRASIL, 2010). Neste contexto a cidade de Várzea Grande, região metropolitana de Cuiabá, apresentou um processo de urbanização acelerado entre as décadas de 1970 a 2010. Como resultado a população

de Várzea Grande recebeu imigrantes de outros estados e sua população apresentou altas taxas de crescimento (VÁRZEA GRANDE, 2007).

O município de Várzea Grande integra a Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá (RMVC), criada pela Lei Complementar nº 359/2009. Uma região com população superior a um milhão de habitantes, concentrando muitas atividades econômicas. A RMVC transformando-se em um centro de serviços especializados, financeiros e industriais (ROMANCINI, 2017).

### **2.3. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESPAÇO URBANO**

O Sensoriamento remoto (SR) tem sido usado em áreas urbanas para diversos fins, como: avaliação de ilhas de calor, classificações de cobertura do solo e dados de entrada para os modelos de trocas da atmosfera com superfície urbana (MARTIN et al. 2015, SHARMA et al. 2013, GOMES et al. 2013). Ao comparar dados de SR com dados espectrais obtidos em abrangência local (como os sensores instalados em bases fixas) são notáveis questões relacionadas a qual tipo de sensor escolher. O SR tem como grande vantagem o mapeamento espacial de uma extensa área (LUCENA, 2019).

Com o aumento da população nas cidades, a área urbana tende a se expandir e vegetação nativa em torno desta aos poucos é substituída por outras coberturas. O crescimento das cidades provoca mudanças no comportamento espectral da cobertura do solo e para caracterizar estas mudanças podem ser utilizados índices espectrais obtidos por sensoriamento remoto (SR).

Os índices espectrais são sensíveis as variações no meio e fornece dados numéricos que podem ser utilizados de diversas maneiras, como indicar qual tipo de cobertura do solo há no local. Os índices podem ser usados para classificar diferentes classes de cobertura do solo quando utilizados de forma integrada (CHEN et al. 2006).

O crescimento das cidades pode ser caracterizado com auxílio de índices espectrais obtidos por sensoriamento remoto (SR). À exemplo de SHARMA et al. (2013) que utilizaram de vários parâmetros biofísicos derivados do satélite Landsat-TM e a partir desses eles fizeram uma classificação de cobertura do solo de área urbana (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI, Normalized Difference Built-up Index - NDBI, Normalized Difference Water Index – NDWI, Modified Normalized Difference Water Index - MNDW, Normalized Difference Bareness Index - NDBAI).

O índice espectral NDVI é amplamente utilizado em estudos de vegetação: conteúdo de clorofila, estresse hídrico, estimativa de biomassa, estudos de padrões de chuva, monitoramento de seca e inclusive estudos de ilhas de calor de superfície. SUN et al. (2015) utilizaram o NDVI junto com dados meteorológicos para caracterizar dinâmica vegetal no Norte da China. MARTINS et al. (2015) utilizou NDVI e outros índices espectrais para avaliar mudanças provocadas por substituição do uso do solo em áreas de vegetação nativa por monoculturas agrícolas. O índice também pode ser utilizado no cálculo da temperatura de brilho para caracterizar ilha de calor (MARTIN et al. 2015).

Outro índice utilizado para classificação de cobertura do solo é o NDBI, utilizado para extração de áreas construídas e estudo ilhas de calor de superfície (LIU & ZHANG, 2011; MOREIRA FILHO & TAVARES JUNIOR, 2016). O NDBAI usado na extração de áreas nuas deficientes em umidade (CHEN et al. 2006). NDWI é em estudos de vegetação, pois dá uma indicação de umidade da vegetação (GABOR & JOMBACH (2009). E o último, MNDWI introduzido por SHARMA et al. (2013) com objetivo de obter de áreas cobertas com água a partir de imagens de satélite.

Estes estudos das variações térmicas em ambiente urbano são importantes devido as consequências de alteração na cobertura do solo que passa a intensificar o desconforto térmico da população. Discutiram que as áreas de menores valores de NDVI apresentaram as temperaturas mais elevadas em áreas urbanas (COSTA et al. 2010, MORAES et al. (2017).

#### **2.4. BALANÇO DE ENERGIA DE SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO REMOTO**

A obtenção de variáveis como temperatura de superfície, albedo e emissividade pelo sensoriamento remoto (SR) foi um avanço para as ciências ambientais. Para cada pixel de uma área é possível calcular o saldo de radiação e os fluxos de energia. Na literatura diversos algoritmos baseados em dados de SR são apresentados e se tornam interessantes por utilizar poucos dados oriundos de estações meteorológicas (LI et al. 2014; ZHANG & CHEN, 2018; MIRANDA et al., 2018, SAFARRAD et al., 2019).

Atualmente, utilizam-se imagens de satélite para obter produtos para avaliação do balanço de energia da superfície. Existem vários algoritmos para obtenção dos parâmetros do balanço de energia de superfície como por exemplo: Surface Energy

Balance Algorithm for Land - SEBAL; BASTIAANSSEN, 1995), Simplified Surface Energy Balance Index - S-SEBI; MENENTI & CHOUDHURY, 1993), Surface Energy Balance System – SEBS; SU, 2002) e Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration - METRIC; ALLEN et al. 2007a).

O algoritmo SEBAL, proposto por BASTIAANSSEN (1995), se trata de uma ferramenta amplamente utilizada com o objetivo de fazer o balanço de energia que requer uma pequena quantidade de dados de entrada e utiliza imagens de satélite. A sua vasta aplicação ocorre porque se baseia em parametrizações físicas estabelecidas e pouco complexas. Além disso, pode ser usado com dados radiométricos com diferentes resoluções temporais e espaciais pela sua característica modular (PAIVA et al. 2016).

A determinação do balanço de energia pelo SEBAL envolve três passos principais: quantificar a energia líquida ( $R_n$ ) das radiações de onda curta e de onda longa recebida e emitida pela superfície; e (ii) estimar os fluxos de calor no solo ( $G$ ); fluxo calor sensível ( $H$ ); fluxo de calor latente ( $LE$ ) e evapotranspiração ( $ET$ ).

A evapotranspiração ( $ET$ ) possui relevância no estudo do equilíbrio do clima em uma área urbana. Isto porque constitui-se em parâmetro de perda de água liberada em forma de vapor para atmosfera oriundos da vegetação e do solo (MARTELLI & SANTOS JÚNIOR, 2015). A  $ET$  é responsável por grande parte do volume de água transferido dos continentes para a atmosfera e desempenha um papel de suma importância na liberação de calor latente (BASTIAANSSEN et al., 1998).

A  $ET$  é variável no espaço e no tempo (ALLEN et al. 2002). É variável no espaço devido à grande variabilidade espacial das precipitações, características hidráulicas dos solos, tipos de vegetação e densidade, e variável no tempo devido à sazonalidade do clima. Entretanto, o conhecimento da variabilidade espacial das taxas de  $ET$  voltadas para áreas urbanas atualmente é limitado.

O algoritmo SEBAL foi utilizado para aplicações em áreas urbanas no Brasil. Desde áreas urbanas na região Norte do país, em Humaitá/AM (PAVÃO et al., 2016), na região Sul, Salto do Lontra/PR (SILVA et al. 2018a) e na região Centro-Oeste, em Goiânia (RIBEIRO et al., 2018). Sua vasta aplicação é experimentada por pesquisadores de diversas áreas do conhecimento.

Com relação aos componentes do balanço de energia há na literatura a pesquisa realizada na cidade de Patos, região nordeste do Brasil (GOMES et al. 2013). Onde os menores valores de ET foram para a área urbanizada e solo exposto, devido à sua baixa disponibilidade de umidade. A expansão urbana foi fator determinante para alteração da qualidade ambiental e contribui com mudanças nos parâmetros do balanço de energia.

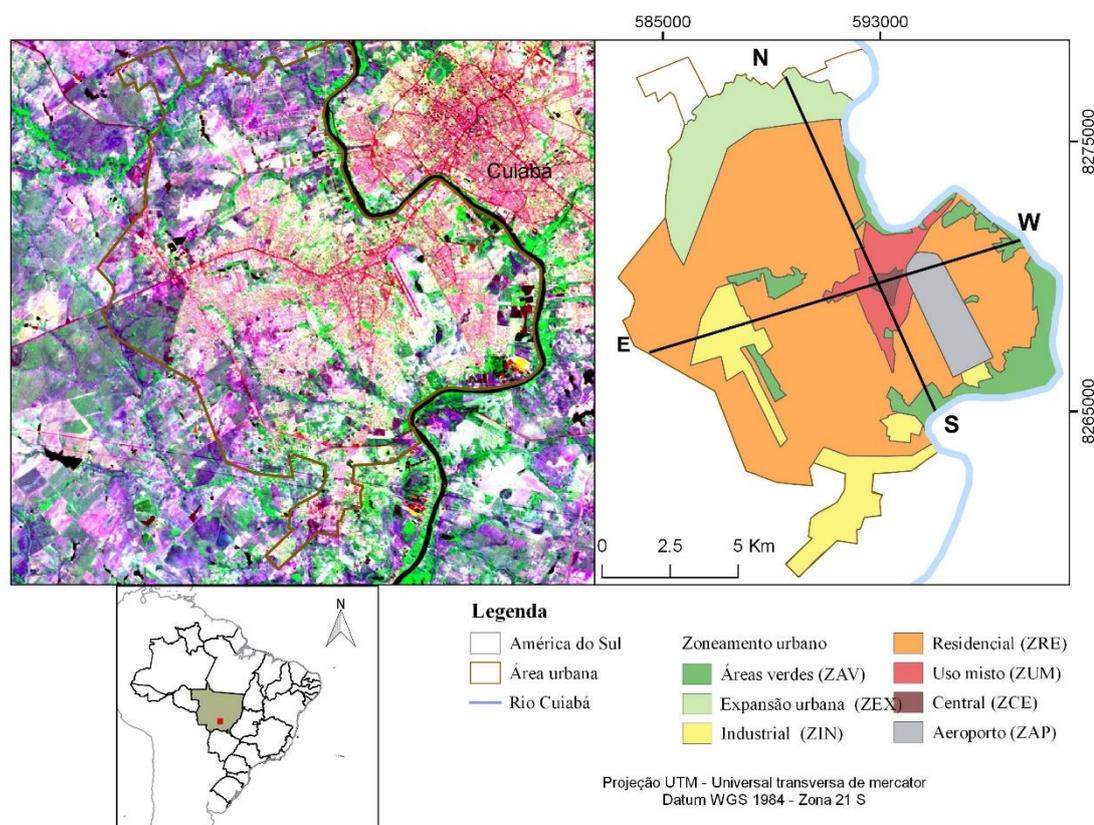
Nessa perspectiva a impermeabilização do solo causada pela urbanização tem grande influência podendo afetar assim o microclima das áreas alteradas (ALVES et al. 2017). A radiação de onda longa incidente e radiação de onda longa emitida em áreas de corpo d'água e vegetada apresentam valores inferiores ao observado em áreas urbana. Nessa perspectiva, a impermeabilização do solo tem grande influência no balanço de radiação podendo afetar assim o microclima das áreas afetadas por estas alterações.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na cidade de Várzea Grande, uma cidade de cerca de 282 mil habitantes (IBGE, 2018) situada à margem oeste do rio Cuiabá, que a separa da capital do estado de Mato Grosso, Cuiabá. Situada em uma planície descrita geomorfologicamente como “Depressão Cuiabana” com ponto central em 15° 38' 48" S e 56° 07' 57" W (Figura 1).

A região apresenta, de acordo com a classificação de Koppen, um clima Aw, ou seja, tropical semi-úmido, com duas estações bem definidas: inverno seco de maio a setembro, com o ápice da seca entre junho e agosto (ALVARES et al. 2013) e verão úmido, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro com total pluviométrico de 1400 mm por ano. As temperaturas médias estão entre 23 e 24 °C para a cidade com uma diferença entre estações meteorológicas rural para o centro de 1,22° C (COX, 2008).



**Figura 1** - Localização da área de estudo, perfis (N-S, Norte-Sul e W-E, Oeste-Leste) e zoneamento da área urbana do município de Várzea Grande, Mato Grosso - Brasil. Imagem de satélite Landsat 5 do ano de 2011, composição falsa cor (RGB 543).

### 3.1.1. Zoneamento Urbano de Várzea Grande

O perímetro urbano do município foi subdividido em dez zonas pela prefeitura da cidade na Lei do Zoneamento de Uso e Ocupação do Solo Urbano (Várzea Grande, 2012). A partir do zoneamento do governo foram organizadas para este estudo em sete zonas (Tabela 2) para melhor dispor os dados. São elas: Expansão Urbana (ZEX); Zona Central (ZCE); Zona de Uso Misto (ZUM); Zona Predominantemente Residencial (ZRE); Zona de Proteção do Aeroporto (ZPA); Zona Industrial (ZIN) e, por fim, a Zona das Áreas Verdes (ZAV) resultado da união de duas zonas originais de Conservação e Preservação Ambiental do município.

**Tabela 2** - Nomenclatura e descrição das zonas da área urbana de Várzea Grande.

ZONA	SIGLA	ÁREA (hectares)	DESCRIÇÃO
Expansão Urbana	<b>ZEX</b>	1622,5	Zona destinada à ampliação da ocupação urbana
Central	<b>ZCE</b>	87,9	Alto grau de concentração de atividades diversificadas das funções urbanas
Uso Misto	<b>ZUM</b>	753,3	Comércio e serviço de bairros e setores
Residencial	<b>ZRE</b>	9411,6	Áreas urbanas que privilegiam o uso residencial
Proteção do Aeroporto	<b>ZPA</b>	697,5	Área do Aeroporto Internacional Marechal Rondon
Industrial	<b>ZIN</b>	1478,7	Área industrial
Áreas verdes	<b>ZAV</b>	1559,5	São destinadas a contribuir para manutenção e o equilíbrio ecológico, paisagístico e cênico no território do Município

FONTE: Várzea Grande, 2012.

Para detalhar a análise espacial e o avanço da urbanização foram realizados dois perfis (Figura 1). O perfil N-S se inicia no extremo norte da área urbana. Na ZEX, zona de expansão, local em que na imagem de 1986 não apresentava ainda alterações antrópicas de grande porte. Mas em 2011 a urbanização já está presente em extensas áreas com solo exposto nessa porção da cidade.

Após isto, o perfil passa pela ZRE, uma zona destinada ao uso residencial, mas com baixa densidade de construções em 1986. Em seguida por um trecho de poucos metros na área com vegetação (ZAV), retornando para uma porção residencial mais densa. Em seguida o perfil intercepta as ZUM e ZCE, que representam o Centro Comercial da cidade, que são as porções com mais construções, asfalto e fluxo de veículos.

O local à oeste do aeroporto é o antigo núcleo de povoamento a partir do qual a cidade se expandiu. Após isto o perfil passa novamente por uma porção residencial, mas que representa baixos antigos da cidade, que estava presente desde 1986, mas com menor densidade. Por fim a última zona é ZAV que está presente até o final do perfil, próximo à margem do rio Cuiabá.

O perfil W-E atravessa outras zonas da cidade que não estão presentes no perfil N-S. Inicia-se no extremo oeste da cidade, região onde predominam bairros com casas populares, organizadas em loteamentos. No início do perfil a zona ZRE representa um local que ficou sem construções no período estudado.

Em seguida o perfil atravessa a ZIN, destinada a atividades industriais que possui uma ocupação já estabelecida por estas atividades. O perfil segue para ZRE em um contexto diferente. Uma região antiga da cidade, que já era povoada desde 1986. Em 2011 houve um adensamento populacional e a presença de materiais impermeáveis maior.

Em seguida o perfil passa sobre as zonas ZUM e ZCE, que são as que possuem a maior parcela de urbanização de toda a área estudada. Compreendem o centro comercial da cidade, na ZCE predomina o comércio e ZUM há uma mistura de porções residenciais com comércio intenso.

O uso do solo na cidade de Várzea Grande exibe mais de uma região comercial, como é de costume nas cidades do seu porte. E a urbanização é observada em corredores comerciais distribuídos nas vias de maior tráfego e, entre eles, regiões residenciais (COX, 2008).

Aos 11 Km do início do perfil encontra-se a ZAP, local destinado ao aeroporto. A cobertura neste local é formada por concreto, a pista de decolagem e vegetação rasteira com exemplares arbustivos. Por fim o perfil retorna para ZRE, local caracterizado por ocupação residencial de baixa densidade. O perfil encerra na ZAV com vegetação arbórea que se estende até o limite com o Rio Cuiabá.

### **3.2. DADOS DE SENSORES ORBITAIS**

Imagens de satélite do Landsat 5 do sensor Thematic Mapper (órbita 226 e ponto 71) foram obtidas por meio da plataforma ESPA do serviço geológico americano (USGS). As imagens são do período de seca na região, 08/08/1986 e 12/08/2011, o que possibilita menor ocorrência de nuvens na imagem. Além disso, estes anos foram

selecionados porque são próximos aos limites série temporal do satélite, esta diferença de data permite a coleta de informações a respeito da conversão da cobertura do solo no período de estudo.

Elas consistem em sete bandas, das quais as três primeiras são do espectro visível, a quarta do infravermelho próximo, cinco e sete são da região de infravermelho de ondas curtas e a sexta é a banda termal. As bandas 1 a 5 e 7 foram utilizadas com as refletâncias corrigidas aos efeitos da atmosfera. A banda 6 foi utilizada com reflectância do topo da atmosfera.

A temperatura de superfície (LST) foi obtida a partir da temperatura de brilho (TB), correspondente a banda termal ( $\rho_6$ ). Para isto foi utilizado o algoritmo Monowindow proposto por QIN et al. (2011) que busca uma estimativa confiável. Que além da TB utiliza dados de emissividade, temperatura atmosférica no momento da passagem do satélite, correção atmosférica, transmitância atmosférica e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

Para obter a temperatura deve-se fazer a correção dos efeitos da atmosfera na banda termal, promovem erros significativos na obtenção direta da LST. Devido ao espalhamento da radiação eletromagnética pelos gases constituintes e aerossóis (BARSI et al., 2003). O princípio da correção atmosférica é o de subtrair a radiância termal atmosférica ascendente e radiância refletida pela atmosférica registrada ao nível do satélite, de forma que a temperatura obtida seja somente aquela advinda da superfície (QIN et al., 2001).

O algoritmo Monowindow proposto por QIN et. al. (2001) necessita dos dados de entrada: emissividade da superfície, transmitância e média efetiva da temperatura atmosférica (LIU e ZHANG, 2011). Uma alternativa para a correção da atmosfera que necessita de dados simples e fornece valores de temperatura precisos após correção.

Assim, as imagens de satélite passaram por etapas de pré-processamento, que consistiram em (i) empilhar as diversas camadas da imagem em um único arquivo; (ii) recorte para o tamanho da área urbana; (iii) correção atmosférica da banda termal.

### **3.3. DADOS METEOROLÓGICOS**

Os dados meteorológicos foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) cuja estação está localizada em Cuiabá/MT (Tabela 3). Nas datas das

imagens escolhidas e nos cinco dias que antecederam não houve precipitação em Várzea Grande.

**Tabela 3** - Dados das imagens de satélite utilizadas e dados meteorológicos correspondentes (Dados da estação automática do INMET - Cuiabá).

Data	Tmax	Tmed	Tmin	UR	Insolação
07/08/1986	36,0	26,7	20,1	54,0	7,5
12/08/2011	39,9	29,5	20,4	57,5	9,7

ID (código da imagem Landsat); Tmax (Temperatura do ar máxima); Tmed (temperatura do ar média); Tmin (temperatura do ar mínima); UR (umidade relativa média);

### 3.4. ÍNDICES ESPECTRAIS

Os cálculos de razões entre as bandas das imagens de satélite originaram vários índices, que foram utilizados como um realce espectral para a classificação da cobertura do solo. São eles: verdor (NDVI), nudez (NDBI), intensidade das construções (NDBAI), grau de umidade (NDWI) e presença de água (MNDWI). A metodologia de classificação utilizada aqui se baseou na utilizada para investigar correlação de vários parâmetros biofísicos em conjunto com a resposta térmica (SHARMA et al., 2013).

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é comum em estudos de vegetação e foi utilizado no algoritmo com o objetivo de identificar as áreas de vegetação na classificação. O NDVI utiliza as bandas do vermelho ( $\rho_3$ ) e infravermelho ( $\rho_4$ ) de imagens Landsat (Feng et al. (2018); Mathew et al. (2018)). O índice de áreas construídas por diferença normalizada (NDBI) foi utilizado para realçar áreas com acúmulo de construções. Este foi calculado a partir de duas bandas do infravermelho ( $\rho_4$  e  $\rho_5$ ) pela equação (2) (DAI et al., 2018; MATHEW et al. 2018).

$$NDVI = (\rho_4 - \rho_3)/(\rho_4 + \rho_3) \quad (1)$$

$$NDBI = (\rho_5 - \rho_4)/(\rho_5 + \rho_4) \quad (2)$$

O índice de áreas de nudez por diferença normalizada (NDBAI) foi utilizado para realçar áreas de solo exposto. Este foi calculado a partir de duas bandas do infravermelho ( $\rho_5$  e  $\rho_6$ ) com a equação (3) (SHARMA & JOSHI, 2016; SANNIGRAHI et al. 2018). Para destacar áreas úmidas ou cobertas com água foram utilizados dois índices: índice de água por diferença normalizada (NDWI, GAUTAM

et al. 2015; FENG et al.,2018) e o índice modificado de água por diferença normalizada (MNDWI, SHARMA et al.,2013). Estes foram calculados a partir das bandas descritas nas equações (4) e (5).

$$NDBAI = (\rho_5 - \rho_6)/(\rho_5 + \rho_6) \quad (3)$$

$$NDWI = (\rho_4 - \rho_5)/(\rho_4 + \rho_5) \quad (4)$$

$$MNDWI = (\rho_1 - \rho_5)/(\rho_1 + \rho_5) \quad (5)$$

### 3.5. CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DO SOLO

A técnica de classificação com algoritmo hierárquico baseado em árvore de decisão foi utilizada para categorizar as imagens de satélite em classes de cobertura do solo. Testes de hipóteses que avaliam as variáveis e condições definidas pelo usuário. Mapas de classificação da cobertura do solo e tabelas foram geradas a partir dessa classificação.

Para melhor análise da alteração da área de cada classe da cobertura do solo foi estimada a mudança de cobertura de superfície (LCC) por: equação (6) por hectare e a equação (7) em porcentagem, que é definida da seguinte maneira:

$$LCC(\text{ha}) = LC_{2011} - LC_{1986} \quad (6)$$

$$LCC(\%) = \frac{LCC(\text{ha})}{LC_{1986}} \times 100 \quad (7)$$

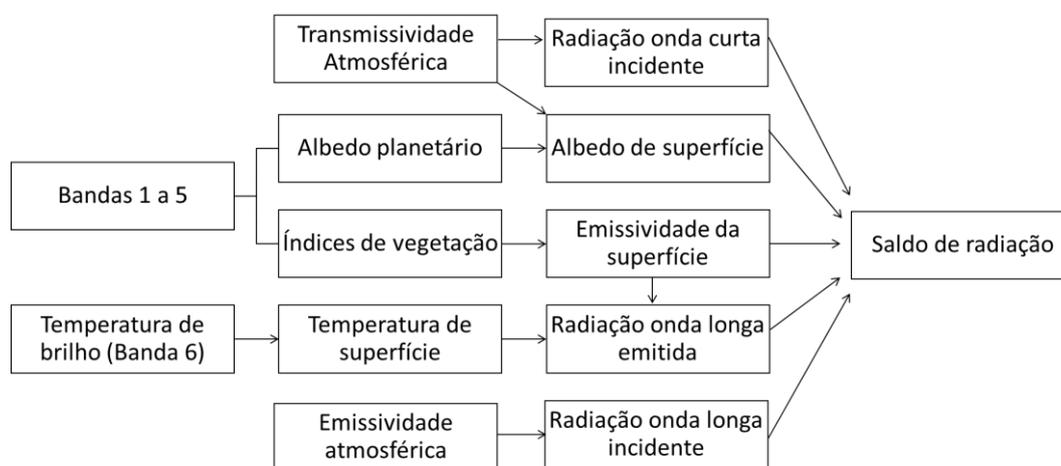
em que  $LCC(\text{ha})$  corresponde à mudança de cobertura de superfície em hectares;  $LCC(\%)$  é a mudança de cobertura de superfície em porcentagem;  $LC_{2011}$  e  $LC_{1986}$  são a área total do tipo de cobertura do solo em hectares no ano de 1986 e no ano de 2011.

### 3.6. ALGORITMO SEBAL

O algoritmo SEBAL foi utilizado para obter a estimativa do balanço de energia e evapotranspiração para a área de estudo. A partir dos dados de entrada o algoritmo calcula para cada pixel o saldo de radiação instantâneo ( $R_{n\text{inst}}$ ), fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor no solo (G). As etapas essenciais do SEBAL são elucidadas em Allen et al. (2007a e 2007b). A visão esquemática do processo utilizado para converter

radiância espectral em saldo de radiação usando imagens Landsat 5 é apresentada na Figura 2.

$Rn_{inst}$  é uma variável fundamental para o cômputo do balanço de energia e foi obtida conforme esquema ilustrado na Figura 2, que envolve a calibração radiométrica, cálculo da refletância, albedo, índices de vegetação, emissividade e temperatura da superfície (LST) é a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ ),  $\alpha$  é o albedo da superfície e NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada, todos calculados pixel a pixel.



**Figura 2** - Fluxograma representando os procedimentos para estimativa do saldo de radiação ( $Rn_{inst}$ , imagem Landsat 5).

O  $Rn$  é o saldo entre os fluxos de incidentes, emitidos e refletidos na superfície terrestre equação (8), no cômputo é consideração a radiação onda curta e onda longa (ALLEN et al. 2002):

$$Rn = R_{s\downarrow} (1 - \alpha_{sup}) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_{sup}) R_{L\downarrow} \quad (8)$$

em que  $R_{s\downarrow}$  é a radiação onda curta incidente medida ( $W m^{-2}$ ),  $\alpha_{sup}$  é o albedo de superfície,  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera ( $W m^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W m^{-2}$ ) e  $\epsilon_{sup}$  é a emissividade da superfície.

O cálculo da  $R_{L\uparrow}$  e  $R_{L\downarrow}$  foi realizado utilizando as equações (9 e 10) de Stefan-Boltzman (ALLEN et al. 2002).

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_{sup} \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4 \quad (9)$$

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (10)$$

$$\epsilon_{\text{atm}} = 0,625 \left( \frac{1000 e_a}{273.15 + T_a} \right)^{0,131} \quad (11)$$

em que  $\epsilon_{\text{sup}}$  e  $\epsilon_{\text{atm}}$  são as emissividades da superfície e da atmosfera,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $T_{\text{sup}}$  é a temperatura da superfície (K) e  $T_{\text{atm}}$  é a temperatura aproximada da atmosfera (K). O G é estimado com base na equação (12) (BASTIAANSEEN, 2000):

$$G = \left[ \frac{T_{\text{sup}}}{\alpha_{\text{sup}}} (0,0038 \cdot \alpha_{\text{sup}} + 0,0074 \cdot \alpha_{\text{sup}}^2) (1 - 0,98 \text{NDVI}^4) \right] \cdot \text{Rn} \quad (12)$$

em que  $T_{\text{sup}}$  é temperatura de superfície,  $\alpha_{\text{sup}}$  é albedo da superfície, NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada e Rn é o saldo de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ ).

### 3.6.1. Fluxo de calor sensível

O próximo passo do SEBAL é calcular o fluxo de calor sensível (H), obtido por gradiente da temperatura próximo da superfície utilizando a equação aerodinâmica clássica (equação 13, BASTIAANSEN et al. 1998):

$$H = \rho_a c_p \frac{(dT)}{r_{ah}} \quad (13)$$

em que  $\rho_a$  é a massa específica do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $dT$  representa a diferença de temperatura próximo a superfície (K),  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível ( $\text{s m}^{-1}$ ) entre duas alturas ( $z_1 = 0,1 \text{ m}$  e  $z_2 = 2,0 \text{ m}$ ).

A  $r_{ah}$  é obtida em função da velocidade de fricção e sua aplicação é realizada após um processo iterativo de correção baseado funções atmosféricas de estabilidade (BASTIAANSEN et al. 1998). Inicialmente a  $r_{ah}$  é obtida pela equação (15):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (14)$$

em que  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $k$  é a constante de von Karman (0,41). Para se calcular  $u_*$  é necessário definir o coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum ( $z_{om}$ ) dado em função do SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) segundo a equação (15, BASTIAANSEN, 2000):

$$z_{om} = \exp(-5,809 + 5,62 \text{SAVI}) \quad (15)$$

em que SAVI é o índice de vegetação ajustado aos efeitos do solo que tenta reduzir os efeitos de fundo no solo.

Usando o perfil logaritmo do vento com a atmosfera em condição neutra obtemos o  $u_*$  (Equação 16).

$$u_* = \frac{k u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)} \quad (16)$$

em que  $u_{200}$  é a velocidade do vento na altura de 200 metros ( $\text{m s}^{-1}$ ), onde o efeito da rugosidade da superfície não influencia a velocidade do vento,  $u_{200}$  é o coeficiente de rugosidade estimado na etapa anterior. Admitindo-se essas condições podemos aplicar a equação (17) para estimar a  $u_{200}$ .

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{om_e}}\right)}{k} \quad (17)$$

em que  $u_*$  é a velocidade de fricção próxima a superfície ( $\text{s m}^{-1}$ ) obtida na equação (18),  $z_{om_e}$  é o coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum próximo da estação ( $z_{om_e} = 0.12h$ , onde  $h$  é a altura da vegetação).

$$u_* = \frac{k u}{\ln\left(\frac{10}{z_{om_e}}\right)} \quad (18)$$

em que  $dT$  é a velocidade do vento medida na estação micrometeorológica ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A resolução do  $T_s$  em cada pixel (equação 19), foi realizada através de uma relação linear com a  $T_s$ , em que os valores dos coeficientes “a” e “b” foram obtidos utilizando informações de dois pixels “âncoras” (BASTIAANSEEN et al. 1998; ALLEN et al. 2002):

$$dT = a + bT_s \quad (19)$$

em que  $a$  e  $b$  são coeficientes obtidos a partir dos pixels “âncoras” e  $T_s$  é a temperatura da superfície corrigida pelos modelos de  $T_s$ .

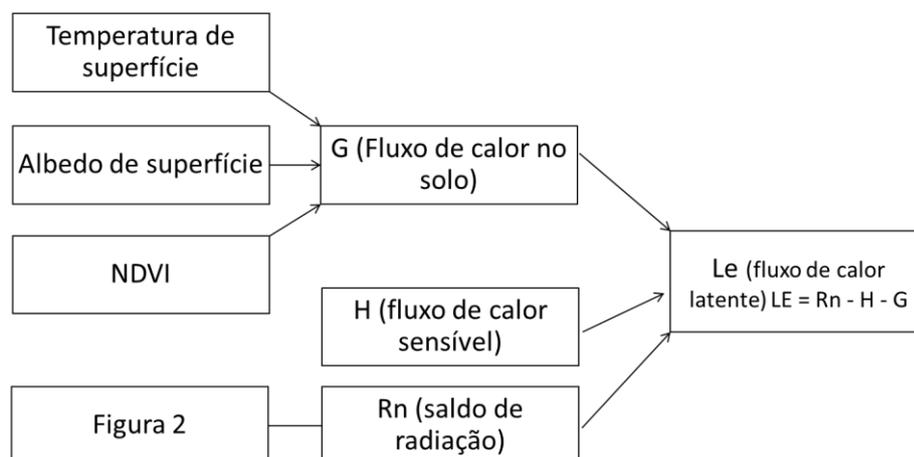
O algoritmo SEBAL utiliza pixels “âncora” que são chamados de “pixel frio” e “pixel quente”. Estes representam condições de extremos hidrológicos. No “pixel quente” assume-se que valor de  $Le$  é zero e  $H$  é máximo. O pixel quente pode ser representado por uma superfície onde a restrição de água é severa, como solos expostos (BASTIAANSEEN et al. 1998; ALLEN et al. 2002).

No “pixel frio” a superfície possui H próximo a zero e Le máximo. Em geral é representado por áreas úmidas. Pode ser representado por um corpo d’água ou uma cultura bem irrigada (BASTIAANSEEN et al. 1998; ALLEN et al. 2002).

Para este estudo, o pixel frio foi considerado para parcelas de vegetação natural e próxima à curso d’água. O pixel quente foi considerado para parcelas de vegetação seca, como pastagem. Obtidos os pixels frio e quente a evapotranspiração pode ser obtida a partir a estimativa do calor latente.

### 3.6.2. Estimativa do fluxo de calor latente e evapotranspiração

A estimativa instantânea do fluxo de calor latente (Le) pode ser dimensionada para períodos mais longos (24 horas). De acordo com o algoritmo SEBAL, a evapotranspiração é obtida após conversão do valor instantâneo do fluxo de calor latente - Le ( $W.m^{-2}$ ) em ET (mm) total das 24h. O Le é obtido como resíduo da equação clássica do balanço de energia à superfície (Figura 3).



**Figura 3** - Fluxograma representando os procedimentos para estimativa da evapotranspiração a partir do fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H) e o saldo de radiação (Rn).

O fluxo de calor latente (Le) é adquirido como um valor residual no balanço energético da equação (20).

$$Le = Rn - G - H \quad (20)$$

em que Le é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ), Rn é o saldo de radiação ( $W m^{-2}$ ), G é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ) e H é o fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ).

Após estimar os componentes do balanço de energia e obter o Le, o cálculo da evapotranspiração diária (ET) pode ser feito a partir da fração evaporativa instantânea

( $FE_i$ ) e do saldo de radiação diário ( $Rn_{24h}$ ). A  $FE_i$  foi obtida relacionando o LE com o Rn e G. Dessa maneira, assumindo-se que a  $FE_i$  é similar a fração diária, a ET pode ser obtida pelas seguintes equações (21, 22 e 23) (BASTIAANSEN, 2000):

$$Le_{24h} = FE_i \cdot Rn_{24h} \quad (21)$$

em que  $FE_i$  é a fração evaporativa instantânea (Equação 30) e  $Rn_{24h}$  é o saldo de radiação diário ( $W m^{-2}$ ) estimado pela Equação.

$$FE_i = \left( \frac{LE}{Rn = G} \right) = FE_{24H} = \frac{LE_{24h}}{Rn_{24h}} \quad (22)$$

$$Rn_{24h} = Rn_{24h} (1 - \text{asup}) - 375,28 \tau_{24h} + 163,45 \quad (23)$$

em que  $FE_{24h}$  é a fração evaporativa diária, a qual foi igualada à  $FE_i$  (Allen et al. 2011; Bastiaanssen et al. 2000),  $Rs_{24h}$  é a radiação solar média de incidência diária ( $W m^{-2}$ ) e  $\tau_{24h}$  é a transmissividade diária da atmosfera para onde curta (Allen et al. 2002). A ET foi estimada por meio da equação (24).

$$ET = \frac{(86400 \times FE_i \times Rn_{24h})}{\lambda_v} \quad (24)$$

em que  $\lambda_v$  é o calor latente de vaporização.

### 3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A amostragem estatística foi realizada para validar a confiabilidade da classificação. A partir de uma matriz de confusão, foram estimadas de taxa de classificação correta, sensibilidade, especificidade e o coeficiente Kappa (Fielding & Bell, 1997). O coeficiente Kappa é a estimativa mais utilizadas em análises de confiabilidade de classificações (CONGALTON & GREEN, 2009).

Todos estes índices necessitam da informação da matriz de confusão, que consiste em quatro elementos: verdadeiro positivo (a), falso positivo (b), falso negativo (c) e verdadeiro negativo (d) (Tabela 4).

**Tabela 4** - Medidas de precisão para avaliar o desempenho preditivo da classificação. Onde a são os verdadeiros positivos, b os falsos positivos, c os falso-negativos, d os verdadeiros negativos (ou ausências) e n = (a + b + c + d) é o número total de locais.

Estimativas	Cálculo
Taxa de Classificação Correta	(a + d)/N
Sensibilidade	a/(a + c)
Especificidade	d/(b + d)
Kappa	$\frac{[(a + d) - ((a + c)(a + b) + (b + d)(c + d))/N]}{[N - ((a + c)(a + b) + (b + d)(c + d))/N]}$

Para esta avaliação 50 pontos foram gerados aleatoriamente para cada classe (total 250 pontos). Estes foram extraídos e comparados um a um com uma imagem em composição RGB. A análise foi realizada visualmente com a sobreposição da imagem utilizada na classificação e com imagens do software Google Earth Pro o que soluciona a questão da defasagem do tempo.

Para manter uma nomenclatura consistente ao descrever o grau de concordância associado à estatística Kappa, os seguintes rótulos serão atribuídos às faixas correspondentes de Kappa (LANDIS & KOCH, 1977): valores  $\leq 0$  como indicadores sem concordância e 0,01–0,20 como fraca, 0,21–0,40 como regular, 0,41–0,60 como moderada, 0,61–0,80 como substancial e 0,81–1,00 como quase perfeita.

Com relação à distribuição espacial das variáveis foram feitos mapas temáticos com graduação de cores no software QGIS, software gratuito da *Open Source Geospatial Foundation Project*. Os intervalos de classes para os mapas foram obtidos pela regra de Sturge (VIEIRA, 1991):

$$K = 1 + 3,322 \log(n) \quad (25)$$

em que  $K$  corresponde ao número das classes e  $n$  a quantidade de dados.

As estimativas do intervalo de confiança ( $\pm 95\%$ ) foram calculadas por bootstrapping com reamostragem de 1000 iterações (Efron, 2000), calculado utilizando o pacote “boot” do programa R (R CORE TEAM, 2015).

Foram realizados perfis espaciais sobre dois eixos da cidade. Os locais dos perfis foram escolhidos de modo a obter o maior número de uso de ocupação do solo de acordo com o zoneamento do governo municipal. Os perfis foram obtidos com os valores de cada variável extraídos a cada pixel interceptou a linha do perfil.

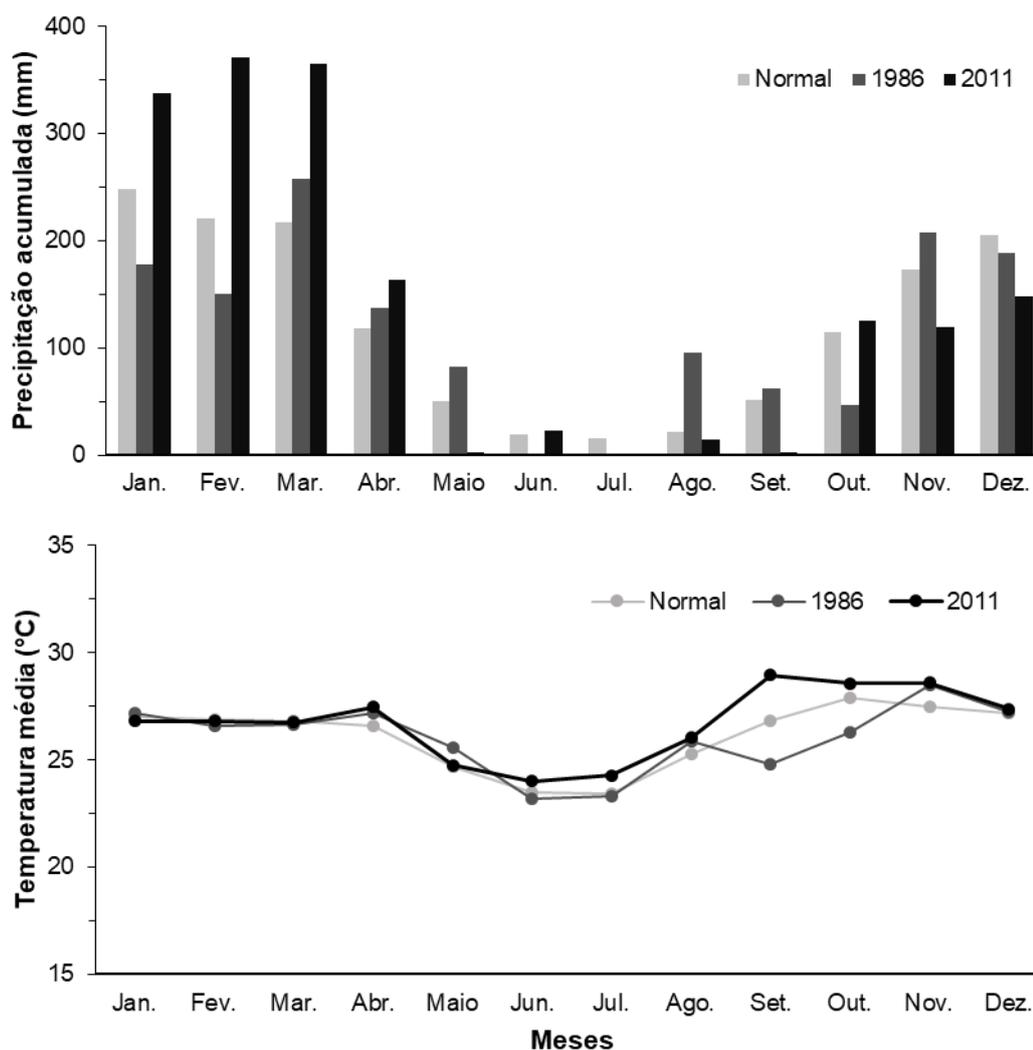
Foi gerado um correlograma para auxiliar na avaliação da relação, distribuição e o grau de correlação entre as variáveis. Foram utilizados os valores dos pixels extraídos para os perfis espaciais das duas imagens de satélite utilizadas. O correlograma foi realizado com a função “*chart.Correlation*” do pacote “*PerformanceAnalytics*” do programa R (R Core Team, 2015) foi utilizada para gerar o correlograma.

No correlograma a distribuição de cada variável é mostrada na diagonal. Abaixo da diagonal os gráficos de dispersão bivariados com linha ajustada. E acima da diagonal os valores de correlação de Spearman ( $r$ ) são mostrados. O nível de significância foi indicado pelos asteriscos, sendo um asterisco para 5%, dois asterisco para 1% e três asterisco para 0,1% (\*0,05; \*\*0,01; \*\*\*0,001).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. PLUVIOSIDADE E TEMPERATURA

A precipitação anual acumulada para 1986 e 2011 foi respectivamente 1406 mm e 1673 mm. Nos meses antecedentes às datas das imagens, de janeiro a julho dos anos de 1986 e 2011 apresentaram respectivamente 806 mm e 1262 mm de precipitação (Figura 4).



**Figura 4** - Normal climatológica (1981-2010) e médias mensais de precipitação e temperatura média do ar nos anos de 1986 e 2011 para Várzea Grande – MT.

Em ambos os anos, nos meses de junho, julho e agosto choveu pouco concordando com o padrão sazonal da região. Em 1986 houve maior homogeneidade na precipitação acumulada entre o primeiro e segundo semestre do ano do que em 2011. Dentre as duas imagens utilizadas o maior acúmulo pluviométrico anual ocorreu

2011, além disso, o maior volume de precipitação predominou no primeiro semestre do ano (Figura 5).

A temperatura do ar apresentou padrão semelhante ao da normal climatológica em ambos os anos analisados (Figura 5). As menores médias de temperatura do ar em ambos os anos ocorreram nos meses de junho e julho. Nos meses de setembro e outubro, a média de 2011 ficou acima da normal climatológica e a média para 1986 abaixo.

#### 4.2. CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO

O conjunto de regras e condições gerados para os dados de Várzea Grande permitiram definir cinco classes de cobertura do solo para Várzea Grande. São elas: (1) FOR - uma classe para vegetação densa (predominante em áreas de preservação permanente com os maiores valores de NDVI, como matas ciliares e parques urbanos); (2) SHR - classe de vegetação dentro da área urbana com característica arbustiva e/ou rasteira, nela predomina vegetação mista de gramíneas e árvores de pequeno porte; (3) BAR – áreas compostas por solo exposto originados por desmatamento; (4) BUP - áreas com características urbanas, compostas de construções e estruturas impermeáveis, como asfalto, concreto e telhados; (5) WAT - coberturas com corpos d'água naturais e artificiais (Tabela 5).

**Tabela 5** - Regras e condições definidas para gerar a classificação de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

Classes	Regra	Condições
FOR	Vegetação densa em parques e matas ciliares	$NDVI \geq 0.5$ ; $0.197 \geq NDWI \geq 0.0$ ; $-0.3 \geq NDBAI \geq -0.48$ ; $-0.07 \geq NDBI \geq -0.19$
SHR	Vegetação esparsa e/ou gramíneas associadas	$0.499 \geq NDVI \geq 0.30$
BAR	Solo exposto	$0.20 \geq NDVI \geq 0.10$ ; $MNDWI \leq -0.5$ ; $NDBAI \geq -0.30$
BUP	Construções, asfalto e concreto.	$0.30 \geq NDVI \geq 0.10$ ; $0.30 \geq NDBI \geq -0.25$ ; $-0.146 \geq NDBAI \geq -0.2$ ; $MNDWI \leq -0.05$
WAT	Corpos d'água: lagos e tanques de piscicultura	$MNDWI \geq -0.27$

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água); NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); NDBI (Índice de construções por diferença normalizada); NDBAI (Índice de aridez por diferença normalizada); NDWI (Índice de água por diferença normalizada); MNDWI (Índice de água por diferença normalizada modificado).

As estimativas de acurácia da classificação de cobertura do solo realizadas nesta pesquisa apresentaram valores distintos para cada classe com altos valores de concordância (Tabela 6). As estimativas da Taxa de Classificação Correta para 1986 apresentaram alta acurácia para todas as classes sendo o menor valor de acurácia para a BUP, todas as outras classes apresentaram valores acima de 0,80, o que é considerado um resultado “quase perfeita” de acordo com a nomenclatura de LANDIS & KOCH, 1977.

**Tabela 6** - Medidas de precisão da classificação de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

Estimativas	Classificação 1986					Classificação 2011				
	FOR	SHR	BAR	BUP	WAT	FOR	SHR	BAR	BUP	WAT
Taxa de Classificação Correta	0,96	0,94	0,98	0,88	0,98	0,98	0,86	0,92	0,88	1,0
Sensibilidade	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	0,96	0,88	0,96	0,95	1,0
Especificidade	0,93	0,92	0,96	0,81	0,96	1,00	0,85	0,89	0,83	1,0
Kappa	0,92	0,88	0,96	0,76	0,96	0,96	0,72	0,84	0,76	1,0

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água);

O mesmo ocorreu para Sensibilidade e Especificidade para 1986, que indicaram valores acima de 0,80 para todas as classes. No coeficiente Kappa a acurácia da classificação da cobertura do solo para 1986 pode ser classificada como de muito boa a excelente. O menor valor Kappa foi para BUP, que obteve o menor valor, o que indica que a classificação foi “substancial” de acordo com a nomenclatura de LANDIS & KOCH, 1977.

Considerando a classificação do ano de 2011, a Taxa de Classificação Correta, sensibilidade e especificidade foi maior do que 0,80 para todas as classes. O Kappa para SHR e BUP teve valores menores do que 0,80. Para as outras classes os valores foram maiores o que indica excelente classificação. A classe WAT em 2011 obteve 100% de Kappa indicando que não houve erro por omissão.

O índice Kappa mostrou que as classes que atingiram menor acurácia ficaram com o nível “substancial” de acordo com a nomenclatura de LANDIS & KOCH, 1977. Como foi o caso da classe BUP em ambas as imagens (1986 e 2011) e SHR em 2011 apresentaram acurácia entre 70 e 80%.

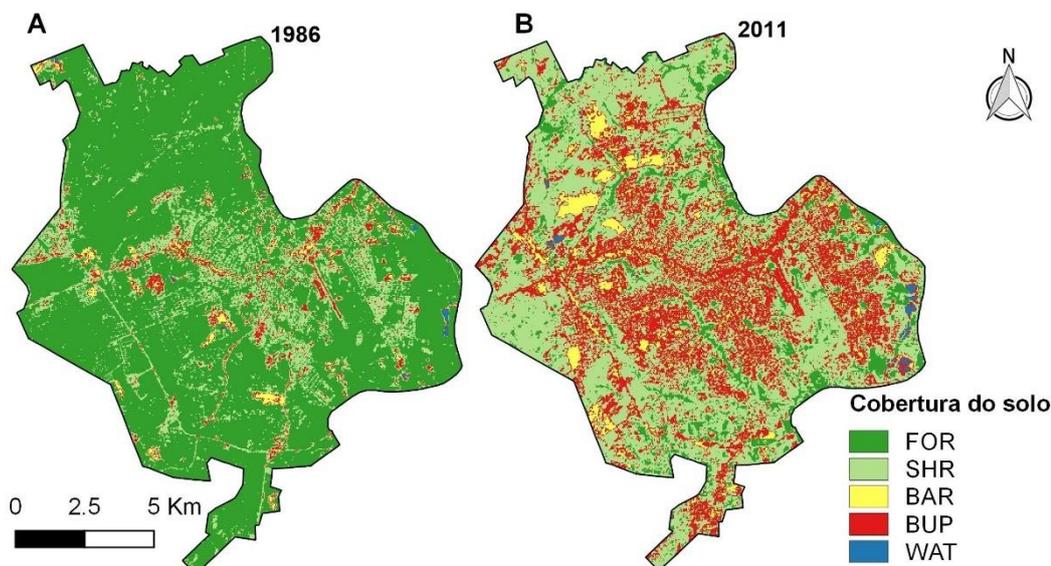
Em 2011 a classe BUP apresenta aproximadamente 6 vezes o tamanho de 1986, indicando alto avanço da urbanização no município. A área de BAR em 2011 apresentou aproximadamente 4 vezes o tamanho que em 1986. E SHR foi a terceira classe a crescer mais na área urbana de 1986 a 2011. Os dados indicam que a classe FOR no período de 1986 a 2011 diminuiu significativamente sua área, em cerca de 85%, em detrimento do crescimento de outras classes de cobertura do solo.

No período de estudo a classe FOR diminuiu sua área em 85%, em detrimento do aumento significativo das outras classes, perdendo cerca de 10,5 mil hectares de área (Tabela 7 e Figura 5). A maior parte da vegetação densa (FOR) foi alterada para SHR e BUP.

**Tabela 7** - Dimensionamento das áreas de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

Classificação	1986 (ha)	2011 (ha)	LUC (ha)	LUC(%)
FOR	12461,9	1864,7	-10597,2	-85,0
SHR	2910,8	8545,8	5635,0	193,6
BAR	212,6	1057,9	845,3	397,6
BUP	650,2	4740,3	4090,1	629,1
WAT	30,8	68,8	38,0	123,4

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água).

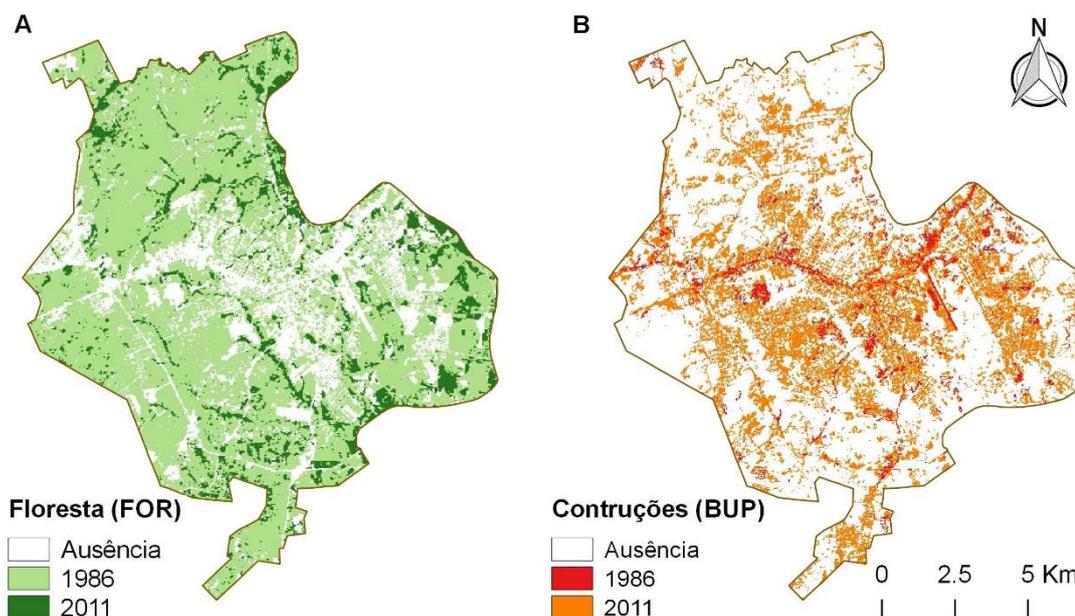


**Figura 5** - Distribuição espacial das classes de cobertura do solo para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. Classes indicadas FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água).

Várzea Grande em 1986 era coberta principalmente pela classe FOR seguida por SHR, as demais classes apresentavam pequena expressão. A floresta em 2011 ficou restrita a pequenas áreas, principalmente nas áreas de preservação permanente (Figura 6a). O avanço da urbanização ocorreu a partir de um eixo central, onde se mantiveram áreas construídas de 1986 e 2011 (Figura 6b).

Em 2011 não houve aparecimento de áreas vegetadas do tipo FOR que não existiam em 1986 (Figura 6a). A área construída (BUP) teve grande expansão pela área urbana em 2011, cerca de 61% deste veio de áreas de floresta (FOR) e outra grande parte de SHR. O que é indicado pela subtração das áreas cobertas por vegetação densa (FOR) em relação às outras. Das áreas de FOR 57% foram convertidas em SHR e 23% em área construída BUP (Tabela 8).

Dentre as classes a que mais foi convertida em SHR foi a classe FOR, e em 2011 apenas 14% se manteve como FOR. E as classes SHR e BAR tiveram sua maior parte convertida para BUP (Tabela 8).



**Figura 6** - Distribuição espacial somente das classes de floresta (FOR, em A) e construída (BUP, em B) para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. FOR (floresta); BUP (construções); Ausência corresponde aos pixels que não eram floresta (A) e aos que não eram áreas com construções (B) em ambos os anos.

**Tabela 8** - Dados do resultado da conversão das classes de cobertura do solo no período para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

Classes 1986	Classes 2011				
	FOR	SHR	BAR	BUP	WAT
FOR	14%	57%	6%	23%	0%

<b>SHR</b>	3%	42%	8%	46%	0%
<b>BAR</b>	1%	22%	17%	60%	0%
<b>BUP</b>	2%	25%	13%	59%	0%
<b>WAT</b>	19%	29%	0%	10%	42%

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água).

A classe FOR em 1986 era a maior cobertura da área urbana, com relação ao zoneamento da cidade ela cobria 46 e 44% das zonas já urbanizadas (respectivamente, ZC e ZUM, Tabela 9). Nas classes que não eram urbanizadas em 1986 a classe FOR representava de 70 a 92%. As zonas ZCE e ZUM apresentavam 40% de SHR em 1986. Em 2011 a situação foi distinta, a classe predominante foi a SHR (51 a 71%) em todas as zonas da área urbana.

**Tabela 9** - Dimensão das classes de cobertura do solo por zona para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

		<b>ZAP</b>	<b>ZAV</b>	<b>ZCE</b>	<b>ZEX</b>	<b>ZIN</b>	<b>ZRE</b>	<b>ZUM</b>
<b>Classe 1986</b>	Não classificado	0,1	1,4	0,3	4,9	6,6	16,1	0,4
	FOR	494,0	1301,3	40,5	1489,5	1279,4	7520,2	333,9
	SHR	145,9	178,4	35,2	105,4	169,0	1974,1	302,4
	BAR	8,3	4,5	0,3	1,4	4,1	169,5	24,6
	BUP	48,6	42,6	11,7	9,8	17,0	429,0	91,5
	WAT	0,4	24,3	0,0	0,0	0,0	5,8	0,4
<b>Classe 2011</b>	Não classificado	0,9	2,9	0,2	0,9	1,9	11,2	0,4
	FOR	58,9	473,2	1,3	198,8	100,1	992,7	37,5
	SHR	445,6	773,6	22,1	1136,7	791,7	5126,6	248,0
	BAR	5,7	27,2	6,2	57,5	91,3	811,9	58,4
	BUP	186,1	225,3	58,1	213,4	491,0	3158,4	408,8
	WAT	0,1	50,5	0,0	3,9	0,1	14,0	0,1

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água). ZAP (Zona proteção do aeroporto); ZCE (Zona central); ZAV (Zona de áreas verdes). ZEX (Zona expansão urbana); ZRE (Zona residencial); ZIN (Zona Industrial); ZUM (Zona uso misto).

As classes de maior crescimento foram SHR e BUP. As zonas ZCE e ZUM que em 1986 tinham menor cobertura de FOR, passaram a ter 66% e 54% de área correspondente à classe BUP, respectivamente. A classe SHR cresceu em detrimento da FOR no período analisado. E que a classe BUP cresceu sobre áreas SHR presentes em 1986. As duas zonas que representam as zonas mais urbanizadas da cidade passaram a ser compostas de BUP e SHR em 2011 (Tabela 9).

### 4.3. DINÂMICA DO NDVI, ALBEDO E TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

Para 1986 o NDVI apresentou os maiores valores para a classe FOR (0,35) e os menores para WAT (0,08-0,11). Em 2011 os maiores valores permaneceram com FOR (0,54) e os menores com WAT. Os valores mais baixos do NDVI ficaram com as porções cobertas com água (lagos artificiais e naturais em meio as áreas verdes), seguido pelas áreas cobertas por solo exposto e áreas construídas (BAR e BUP) nesta ordem (Tabela 10).

**Tabela 10** - Intervalo de confiança das variáveis para média a 95% de cada uma das zonas da área urbana para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

		NDVI	Albedo	LST (°C)
Classes 1986	FOR	0,35 ± 0,001	0,14 ± 0,00	23,0 ± 0,0
	SHR	0,26 ± 0,001	0,16 ± 0,00	24,7 ± 0,0
	BAR	0,13 ± 0,001	0,20 ± 0,00	26,3 ± 0,0
	BUP	0,18 ± 0,002	0,18 ± 0,00	25,8 ± 0,0
	WAT	0,09 ± 0,018	0,13 ± 0,01	23,8 ± 0,1
Classes 2011	FOR	0,54 ± 0,001	0,13 ± 0,00	31,8 ± 0,0
	SHR	0,38 ± 0,001	0,14 ± 0,00	34,9 ± 0,0
	BAR	0,19 ± 0,001	0,18 ± 0,00	36,8 ± 0,0
	BUP	0,26 ± 0,001	0,16 ± 0,00	36,5 ± 0,0
	WAT	-0,01 ± 0,016	0,07 ± 0,00	30,0 ± 0,1

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água). NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície).

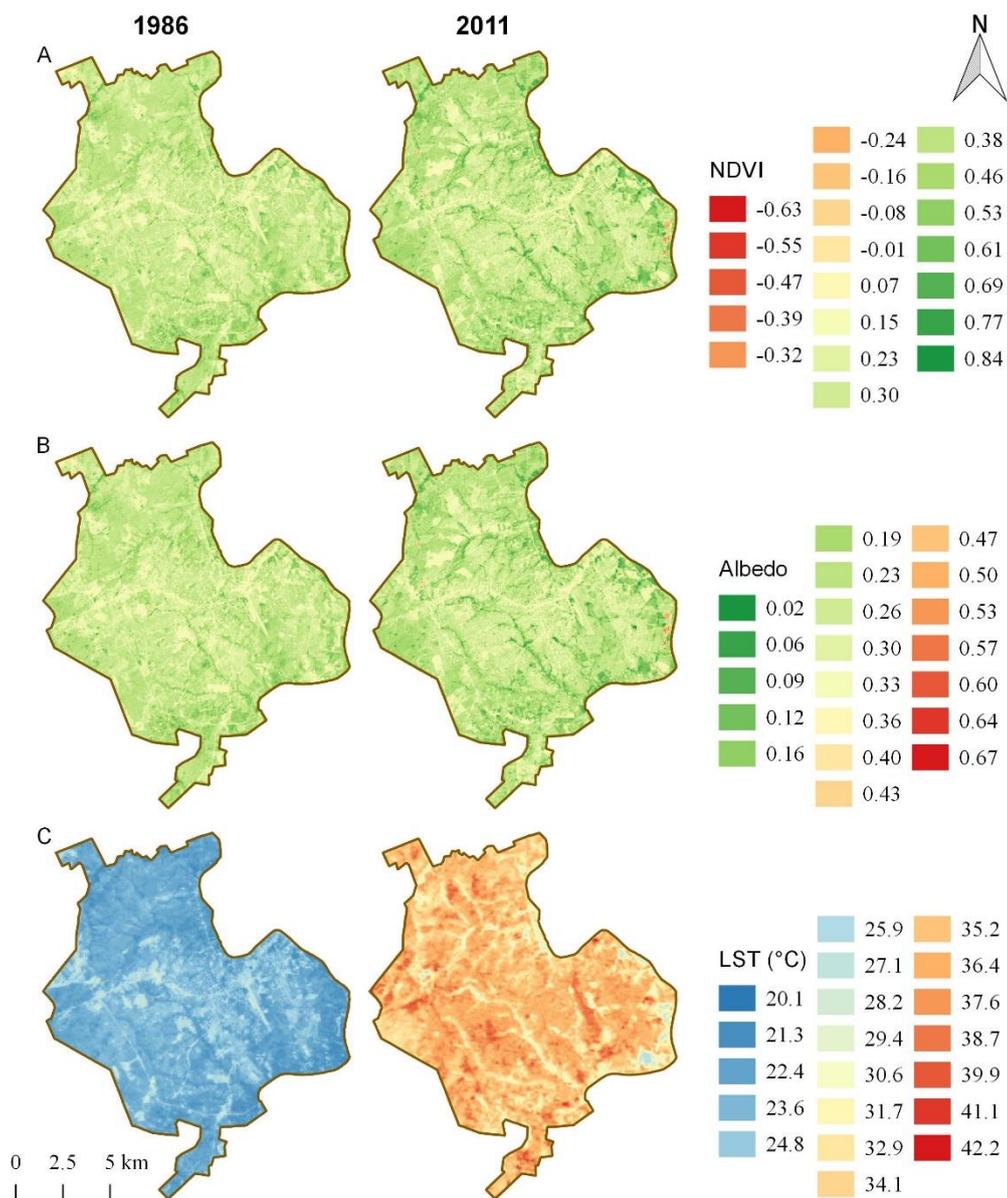
O albedo de superfície apresentou valores em 1986 que variaram de 13 a 20% para toda a imagem, em 2011 a variação foi de 7 a 18%. Nas porções mais urbanizadas, ou seja, alta densidade de construção o albedo foi superior. Em 2011 teve uma variação menor, mas o padrão do maior para o menor permaneceu: BAR, BUP, SHR, FOR e WAT. SHR apresentou intervalo de confiança distinto em relação à BAR e BUP, sendo menor nas duas datas analisadas.

O intervalo de confiança da LST das áreas modificadas por ação antrópica (BAR e BUP) se diferenciam estatisticamente das áreas de vegetação (FOR e SHR).

A classe WAT obteve os menores valores de LST para 1986. Os maiores valores de temperatura de superfície estão na classe BAR, seguida pela classe BUP. Sendo que estas se diferem estatisticamente; e apresentaram 0,4°C de diferença em 2011.

Considerando os intervalos de confiança (IC 95%) a maior diferença (amplitude térmica) esteve entre as classes FOR e BAR para 1986; e WAT e BAR em 2011. A diferença de BAR para FOR em 1986 foi cerca de 3,3 °C. No ano de 2011 a diferença aumentou para 5°C. Outro ponto a destacar foi que em 1986 as classes FOR e WAT apresentavam valores de LST mais próximo do que em 2011.

A distribuição espacial da LST em 1986 (Figura 7) mostrou os valores maiores localizados nas regiões em que havia BUP e BAR. Ficando mais restrita as altas temperaturas ao centro da cidade. Em 2011 a variação espacial dos valores de temperatura é bem maior. As temperaturas mais baixas em FOR são sobre áreas alongadas e estreitas compostas por FOR (mata ciliar).



**Figura 7** - Distribuição espacial do NDVI (A), albedo (B) e LST (C) para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água). NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície).

Em 1986 os intervalos de confiança da LST não se repetem com os de 2011, mas para as outras variáveis isto ocorre. O que pode ser observado inclusive no mapa da Figura 7. Em que a LST predominou com as cores azuis para 1986 e com as cores amarela e vermelha para 2011. Para o NDVI e o albedo a variação espacial das classes de temperatura foi mais discreta do que da LST, nos mapas as cores presentes para ambos os anos foram semelhantes.

#### 4.4. FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA SUPERFÍCIE

O  $Rn_{inst}$  variou de 447 a 503  $W.m^{-2}$ , sendo os maiores valores para os locais onde há corpos d'água e os menores para solo exposto (Tabela 11).

**Tabela 11** - Média (intervalo de confiança a 95%) das variáveis  $Rn_{inst}$ , H, Le e  $ET_{24}$  de cada uma das classes de cobertura do solo da área urbana de Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

		$Rn_{inst}$	H	Le	$ET_{24}$
<b>Classes 1986</b>	FOR	492,3 ± 0,10	160,1 ± 0,20	204,9 ± 0,25	2,72 ± 0,00
	SHR	472,1 ± 0,20	170,9 ± 0,25	166,3 ± 0,40	2,32 ± 0,01
	BAR	447,2 ± 1,00	170,4 ± 0,25	146,1 ± 1,40	2,04 ± 0,02
	BUP	460,1 ± 0,50	172,8 ± 0,65	154,6 ± 1,10	2,16 ± 0,01
	WAT	503,0 ± 3,25	120,9 ± 1,70	238,5 ± 3,50	3,23 ± 0,04
<b>Classes 2011</b>	FOR	480,1 ± 0,20	158,6 ± 0,35	234,7 ± 0,65	3,08 ± 0,00
	SHR	460,0 ± 0,10	187,4 ± 0,20	159,1 ± 0,30	2,30 ± 0,00
	BAR	431,5 ± 0,35	197,8 ± 0,40	108,2 ± 0,50	1,70 ± 0,01
	BUP	447,0 ± 0,02	198,4 ± 0,20	120,5 ± 0,25	1,87 ± 0,00
	WAT	537,7 ± 2,25	89,21 ± 1,80	295,9 ± 3,25	4,32 ± 0,04

$Rn_{inst}$  (saldo de radiação instantâneo), H (fluxo de calor sensível), Le (fluxo de calor latente) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária). FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água).

As áreas com maior valor de albedo, menor NDVI tiveram, conseqüentemente, menor  $Rn_{inst}$ . O intervalo de confiança a 95% indicou que a classe FOR apresentou os maiores valores de saldo após a classe WAT (Tabela 11). Os menores valores para  $Rn_{inst}$  estão nas áreas de BAR. O fluxo de calor sensível (H) teve valores muito baixos nas áreas cobertas com água e os valores mais elevados para as áreas impermeabilizadas por construções e solo exposto.

O padrão das cores no mapa indicou que os fluxos H e Le possuem variação espacial dos valores extremos perceptivelmente oposta (Figura 8). Para  $Rn_{inst}$  e Le os menores valores ficam nas áreas mais densamente construídas e os maiores nas áreas vegetadas ou cobertas por água.

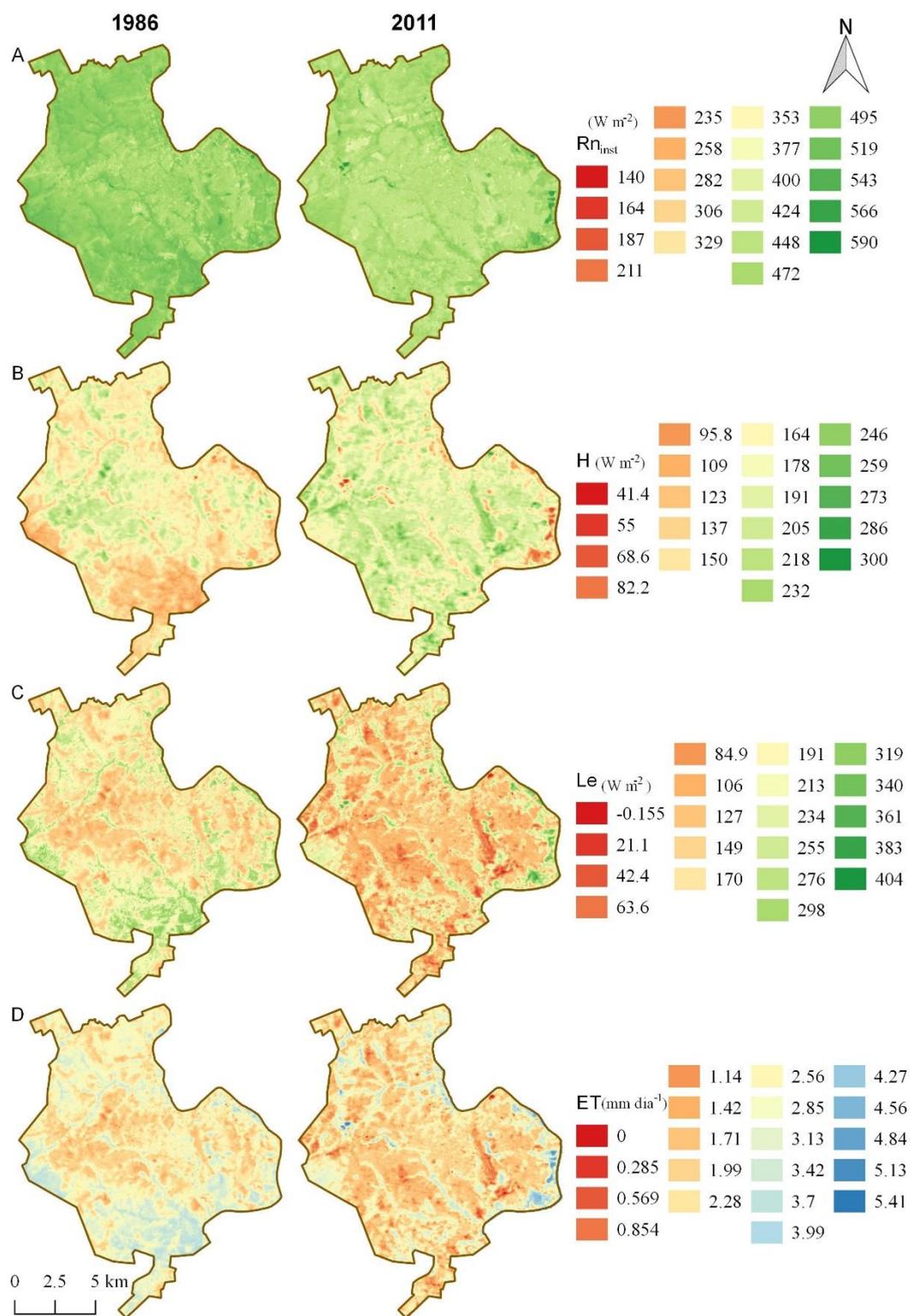
O mapa da distribuição da ET (evapotranspiração diária) mostrou que os resultados acompanharam o padrão espacial dos resultados do fluxo de calor latente (Le, Figura 8).

As classes que obtiveram as menores taxas de ET foram BAR e BUP. Isto devido a presença das construções e áreas de solo exposto compactado nessas coberturas. A baixa taxa de ET foi características de superfícies impermeabilizadas com intenso tráfego de veículos aliado a pouca ou nenhuma vegetação.

Os locais com baixa disponibilidade de umidade resultaram em valores baixos de ET. Esta situação foi observada nas áreas mais alteradas pela ação antrópica (ZCE e ZUM). E os altos valores de ET para áreas úmidas cobertas com água ou vegetação densa encontradas na zona ZAV.

A classe ZAV representa a menor fração da área urbana. Estas áreas apresentaram resfriamento evapotranspirativo (ET) de aproximadamente  $1 \text{ mm.dia}^{-1}$  em relação às zonas mais urbanizadas. As regiões de vegetação nativa (ZAV) próximas à cursos hídricos proporcionam o arrefecimento e aumento da fração evaporativa dentro da área urbana em escala local.

A ZRE (zona residencial) representa a maior parte da área urbana e esta zona mostrou uma taxa de ET intermediária para ambas as imagens. Esta característica existe pela estruturação da área urbana de Várzea Grande, onde predominam bairros com baixa densidade, as casas possuem quintais com vegetação e muitos terrenos baldios (sem construção) entre as construções. Isto ocorre por ser composta de uma mistura das coberturas BUP, BAR e SHR.



**Figura 8** - Distribuição espacial  $Rn_{inst}$  (saldo de radiação, em A),  $H$  (fluxo de calor sensível em B),  $Le$  (fluxo de calor latente, em C) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária, em D) para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011.

#### 4.5. ANÁLISE DO PERFIL ESPACIAL

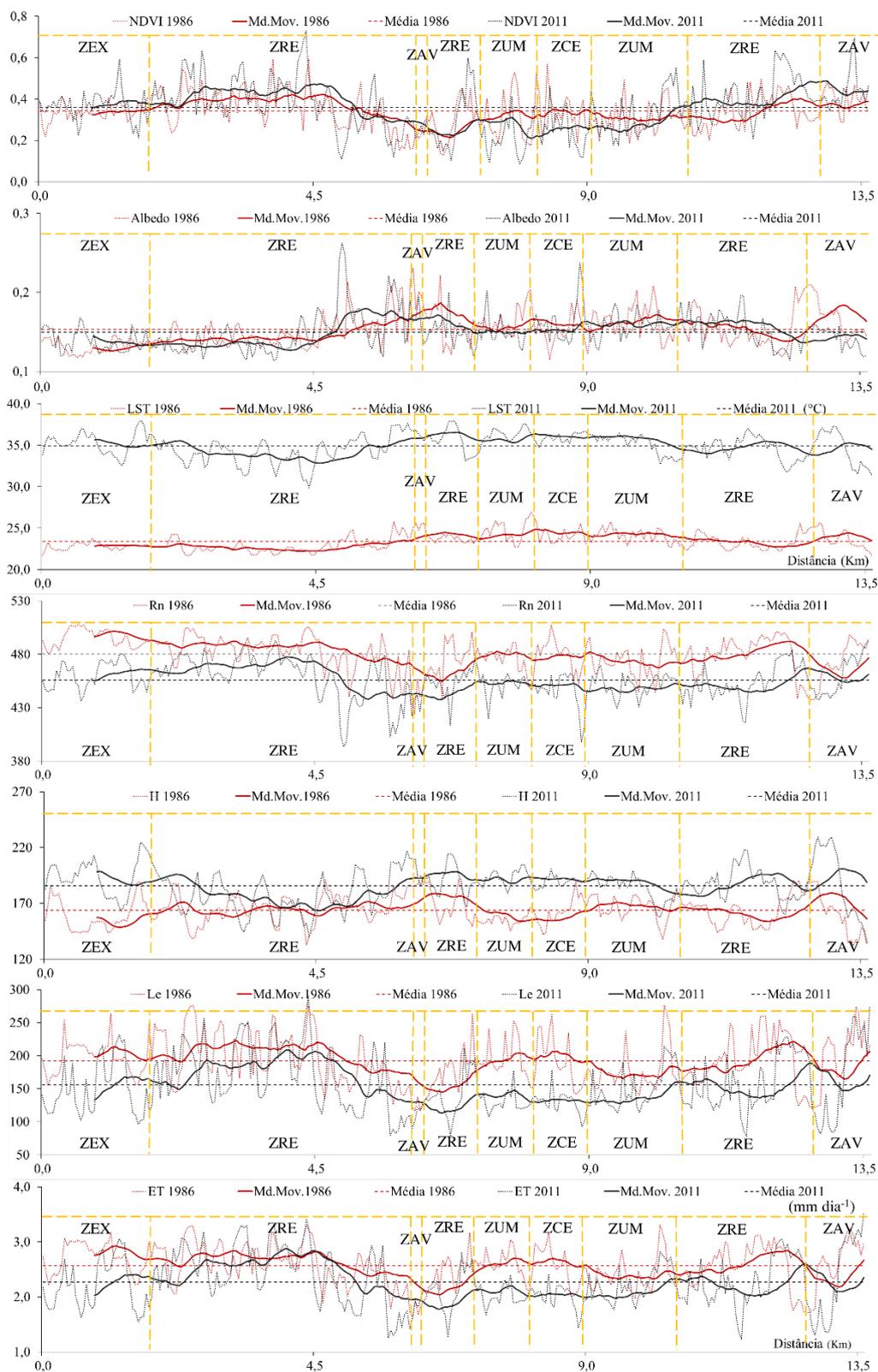
No perfil N-S as zonas ZEX, ZAV e ZRE apresentaram os valores de NDVI acima da média (Figura 9). ZCE, ZUM e parte da ZRE adjacente apresentaram NDVI abaixo da média. No ano de 1986 o NDVI na área central da cidade era em torno de 0,3 (ZUM e ZCE) ligeiramente abaixo da média (0,34), em 2011 passou a ser 30% abaixo da média de 0,36.

No perfil N-S ocorre um pequeno trecho da zona ZAV, onde a vegetação ocorre em meio à solo exposto e área com construções, que ofereceram aumento local no NDVI, mas que influenciou pouco na média móvel (Figura 9). A ZRE que fica próxima ao limite sul do perfil apresentava NDVI abaixo da média de 1986, em 2011 ele ficou ligeiramente acima da média (0,40). Ao final do perfil o NDVI em 2011 aumentou para 0,47 (ZRE) diferente de 1986 que ficou próxima a média (0,40).

O perfil do albedo apresentou comportamento oposto ao NDVI. Nas zonas ZEX e ZRE no início do perfil foi abaixo da média de 0,15 em ambos os anos. Iniciou um crescimento ao se aproximar do limite com as zonas ZAV e ZRE mais centralizadas.

Em 1986 na ZRE próxima ao centro da cidade houve um pico do albedo. Mas nos locais ainda não ocupados por construção ele permaneceu abaixo da média. Em 2011 quando o local apresentava construções e solo exposto os valores do albedo passaram a ser maiores que a média (0,20 com média de 0,15). No restante do perfil o albedo apresentou-se muito próximo da média para ambos os anos (0,15). Ao final do perfil, no Sul, o albedo elevou-se para a acima da média em ZAV no ano de 1986 (0,21), indicando que o local era em grande parte seca em relação às proximidades. Em 2011 o comportamento foi diferente o local estava coberto por vegetação densa e com os valores do albedo próximos à média (0,15).

Os maiores valores da LST ficaram com as zonas mais centralizadas da cidade e com maior densidade de construções. O perfil apresentou comportamento mais constante em 1986 do que em 2011, onde as variações foram maiores em amplitude das áreas centrais para as áreas residenciais afastadas. Isso pode ser explicado com base no adensamento da ocupação em algumas porções da área urbana.



**Figura 9** - Perfil N-S (Norte-sul) para as variáveis NDVI, albedo, LST,  $R_{n_{inst}}$ , H, Le e  $ET_{24}$  para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. Md.Mov. (média móvel); NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície);  $R_{n_{inst}}$  (saldo de radiação instantâneo), H (fluxo de calor sensível), Le (fluxo de calor latente) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária); ZAP (Zona

proteção do aeroporto); ZCE (Zona central); ZAV (Zona de áreas verdes). ZEX (Zona expansão urbana); ZRE (Zona residencial); ZIN (Zona Industrial); ZUM (Zona uso misto).

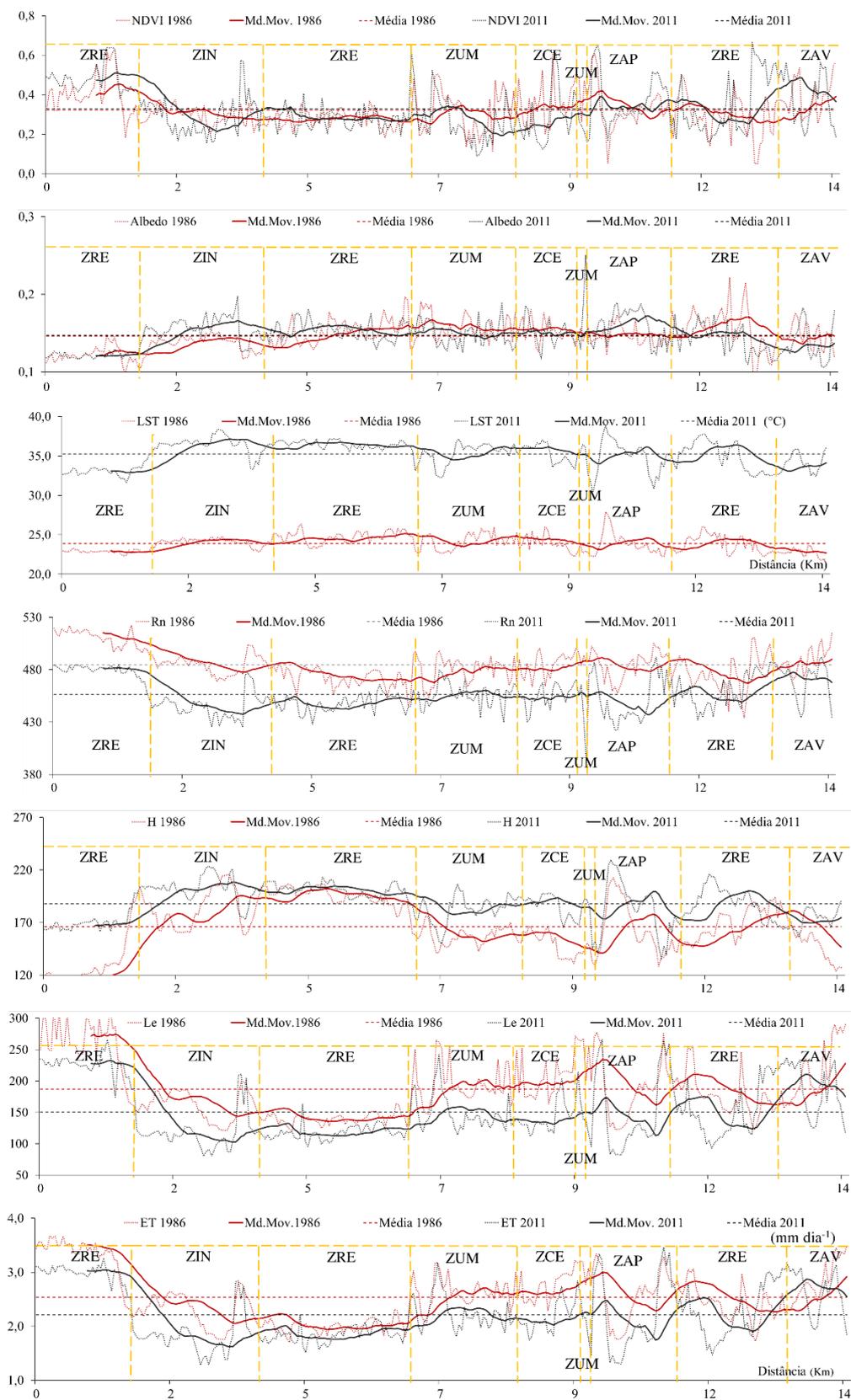
O perfil de  $Rn_{ins}$  indicou que os locais com maior energia disponível foram ZEX e ZRE do norte do perfil. Os menores valores ficaram para ZRE próxima ao centro da cidade. Na parte central (ZUM e ZCE) a curva se estabilizou próxima à média dos dados para ambos os anos (média de  $455 \text{ W.m}^{-2}$  em 1986 e 480 em 2011). O  $Rn_{ins}$  voltou a aumentar ( $500 \text{ W.m}^{-2}$ ) próximo ao final do perfil ao sul), nas proximidades da interface ZRE com a ZAV onde havia porções de vegetação densa em meio à loteamento no ano de 1986.

O fluxo de calor sensível (H) apresentou os menores valores para ZEX em 1986 e para ZRE do início do perfil em 2010. Os maiores valores para a área desmatada no final do perfil (ZAV). Nas zonas centrais (ZUM e ZCE) o fluxo de calor sensível aumentou da ZCE em relação a ZUM em 1986, mas em 2011 o comportamento foi o oposto. Este comportamento oposto ocorreu novamente no final do perfil, em ZRE, onde houve um extremo negativo em 1986 ( $145 \text{ W.m}^{-2}$ ), ocorreu um extremo positivo em 2011 ( $194 \text{ W.m}^{-2}$ ).

O fluxo de calor latente e a ET apresentaram comportamentos opostos ao de H. Os valores maiores para ambas as variáveis foram para ZEX e ZRE do início do perfil. E os menores para ZRE próxima ao centro da cidade. Os perfis indicaram ainda que as áreas centrais da cidade em 1986 tinham maior umidade do que a ZRE próxima ao centro, com aproximadamente  $1 \text{ mm.dia}^{-1}$  de diferença.

O perfil W-E exibiu resultados semelhantes ao perfil N-S, ou seja, os locais com alto NDVI,  $Rn_{ins}$ , H e Le possuem menores valores de albedo, LST e H (Figura 10). No início do perfil, no extremo oeste da área urbana a ZRE era composta em ambos os anos por vegetação. Por isso o NDVI era alto e albedo e LST são abaixo da média.

A ZIN no perfil apresenta uma mistura de área com vegetação nativa, em ambos os anos em contato com indústrias. O que provoca do meio a leste desta zona que ela mude seu comportamento e passe a corresponder realmente à área com construções. Por isso, o albedo, LST e fluxo de calor sensível se elevam nesta porção do perfil.



**Figura 10** - Perfil W-E (Oeste-leste) para as variáveis NDVI, albedo, LST,  $R_{n_{inst}}$ , H, Le e  $ET_{24}$  para Várzea Grande/MT em 1986 e 2011. Md.Mov. (média móvel); NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície);  $R_{n_{inst}}$  (saldo de radiação instantâneo), H

(fluxo de calor sensível), Le (fluxo de calor latente) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária); ZAP (Zona proteção do aeroporto); ZCE (Zona central); ZAV (Zona de áreas verdes). ZEX (Zona expansão urbana); ZRE (Zona residencial); ZIN (Zona Industrial); ZUM (Zona uso misto).

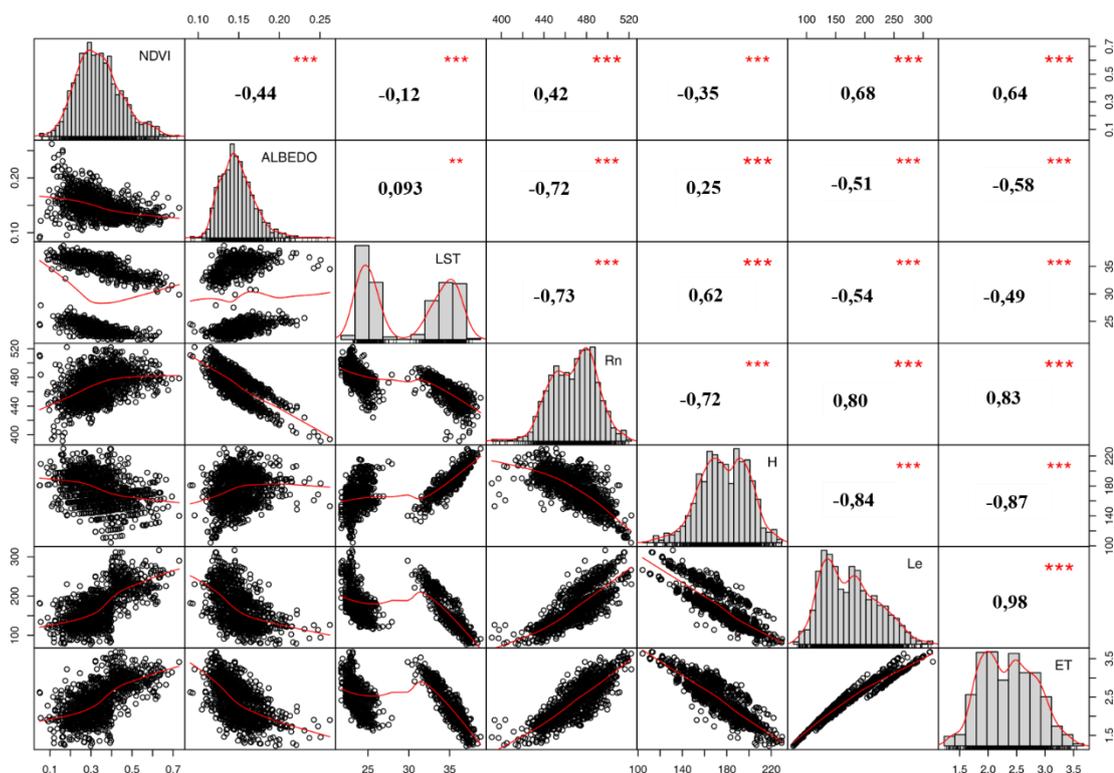
No perfil W-E a zona ZAP ocorre e nela observamos um comportamento distinto das classes adjacentes. Em 1986 o albedo permanece constante dentro da área do aeroporto, mas em 2011 o albedo tem um pico bem no centro da ZAP. A LST mostrou os maiores valores em ambos os anos para ZIN, ZAP e nas ZRE (mais centralizadas). Padrão semelhante é encontrado para H, onde o valor máximo em 2011 ficou para a ZIN (37 °C).

No perfil W-E o  $Rn_{ins}$  apresentou comportamento oposto ao albedo com os menores valores para ZIN, ZAP e ZRE (mais central). Os maiores valores foram para ZAV e no limite da ZAP com ZRE. Neste local ocorre vegetação nativa e corpos d'água naturais dentro da área do aeroporto. O Le e a ET apresentaram semelhante ao  $Rn_{ins}$ . Acima da média dos valores predominaram nos locais onde ocorreram vegetação densa e no ano de 1986.

O NDVI apresentou correlação fraca com a LST, moderada com albedo e  $Rn_{ins}$ ; e forte correlação com Le e ET (Figura 10). A relação entre LST e albedo foi positiva e fraca. O fato de a LST apresentar baixa correlação com albedo pode ser pela ocorrência de dois conjuntos de dados com valores de LST muito diferentes, um de 1986 e outro de 2011.

No histograma da LST pode-se notar o comportamento bimodal da amostra. Ao observar cada conjunto de dados, o grupo de pontos na esquerda são os de 1986 e o à direita os pontos de 2011 com as maiores temperaturas. No histograma fica clara a relação inversa entre NDVI e LST dentro de cada subconjunto com o NDVI.

De acordo com os coeficientes de correlação de Spearman, o  $Rn_{ins}$  apresentou relação linear forte com todas as variáveis e moderada com NDVI. O  $Rn_{ins}$  com Le relação linear foi forte e positiva (0,8). A ET mostrou relação inversa moderada com a LST e relação direta moderada com o NDVI. A ET mostrou relação inversa com a LST (moderada) e H (forte) e relação direta moderada com o NDVI (Figura 11).



**Figura 11** - Correlograma composto dos gráfico de dispersão, histogramas e coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis: NDVI, albedo, LST,  $Rn_{inst}$ , H, Le e  $ET_{24}$  para Várzea Grande/MT com os dados de 1986 e 2011. NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada); LST (temperatura de superfície);  $Rn_{inst}$  (saldo de radiação instantâneo), H (fluxo de calor sensível), Le (fluxo de calor latente) e  $ET_{24}$  (evapotranspiração diária).

#### 4.6. CONVERSÃO DA COBERTURA DO SOLO

No período analisado houve conversão de 58% da floresta (classe FOR) para SHR e 26% para BUP. A classe SHR foi alterada 48% para BUP e 44% se manteve SHR. A classe BAR foi a que obteve a maior taxa de conversão para BUP (66%). A classe BUP manteve 48% e o 28% para SHR, resultado da apresenta mistura espectral presente nestas duas classes. A classe WAT manteve a 75 % como água (Tabela 12).

**Tabela 12** - Conversão de cada classe de 1986 para 2011 em Várzea Grande. Obtido de amostra de 50 pontos aleatório extraídos para ambos os anos.

Classes 1986	Classes 2011				
	FOR	SHR	BAR	BUP	WAT
FOR	4	29	4	13	0
SHR	0	22	4	24	0
BAR	0	8	9	33	0
BUP	3	14	9	24	0
WAT	6	5	0	2	37

FOR (floresta); SHR (arbustos e gramíneas); BAR (solo exposto); BUP (construções); WAT (corpos d'água).

O efeito da conversão no NDVI os valores de 2011 são superiores em relação aos de 1986. O albedo apresentou queda em 2011, o que era esperado devido ao aumento do NDVI. A LST aumentou, esmo com o NDVI tendo se elevado e o albedo diminuído de maneira discreta (Tabela 13).

**Tabela 13** - Intervalo de confiança para média a 95% de 50 pontos originais de cada classe em 1986 e o efeito a conversão nas médias das variáveis NDVI, Albedo e Temperatura de superfície (LST) em 2011.

		NDVI	Albedo	LST (°C)
1986	FOR	0,36 ± 0,021	0,15 ± 0,01	23,1 ± 0,2
	SHR	0,24 ± 0,017	0,17 ± 0,01	25,1 ± 0,3
	BAR	0,13 ± 0,008	0,20 ± 0,01	26,4 ± 0,2
	BUP	0,19 ± 0,020	0,18 ± 0,01	25,6 ± 0,4
	WAT	0,12 ± 0,047	0,12 ± 0,01	23,7 ± 0,3
2011	FOR	0,37 ± 0,030	0,15 ± 0,01	35,2 ± 0,6
	SHR	0,29 ± 0,028	0,16 ± 0,01	36,2 ± 0,5
	BAR	0,25 ± 0,025	0,16 ± 0,01	36,2 ± 0,3
	BUP	0,28 ± 0,034	0,15 ± 0,01	35,8 ± 0,6
	WAT	0,25 ± 0,080	0,08 ± 0,01	30,4 ± 0,5

Os fluxos energéticos apresentaram maior efeito da conversão na classe FOR, em que variou 50 W.m<sup>-2</sup>. O fluxo de calor sensível 36 W.m<sup>-2</sup> maior e Le 60 W.m<sup>-2</sup> menor. Enquanto para a classe SHR a diferença de H foi de 20 W.m<sup>-2</sup> e de Le foi de 37 W.m<sup>-2</sup>. A classe WAT apresentou aumento da sua ET e Le e diminuição do H no período analisado (Tabela 14).

**Tabela 14** - Intervalo de confiança para média a 95% de 50 pontos originais de cada classe em 1986 e o efeito a conversão nas médias das variáveis saldo de radiação (R<sub>ninst</sub>), fluxos de calor sensível (H), latente (Le) e evapotranspiração diária (ET) em W.m<sup>-2</sup>.

		R <sub>ninst</sub>	H	Le	ET
1986	FOR	494,8 ± 4,0	154,2 ± 7,5	214,1 ± 13,9	2,8 ± 0,13
	SHR	467,6 ± 4,5	170,5 ± 6,1	162,0 ± 7,9	2,3 ± 0,11
	BAR	450,7 ± 6,1	165,8 ± 9,3	154,8 ± 10,1	2,1 ± 0,14
	BUP	461,9 ± 7,1	169,1 ± 8,5	160,5 ± 11,5	2,2 ± 0,14
	WAT	509,0 ± 9,3	121,2 ± 4,1	244,6 ± 9,7	3,3 ± 0,12
2011	FOR	456,2 ± 4,9	190,4 ± 7,4	153,4 15,90	2,2 ± 0,18
	SHR	449,2 ± 4,2	199,3 ± 6,9	126,8 ± 11,3	1,9 ± 0,14
	BAR	445,4 ± 3,7	192,5 ± 5,8	126,6 ± 7,5	2,0 ± 0,10
	BUP	452,7 ± 5,8	192,6 ± 8,5	137,5 ± 15,1	2,0 ± 0,18
	WAT	524,8 ± 7,7	110,6 ± 8,1	286,2 ± 11,9	4,0 ± 0,17



## **5. DISCUSSÕES**

### **5.1. CLIMATOLOGIA LOCAL**

A precipitação na área de estudo no período analisado indicou que em 2011 a quantidade de chuvas foi maior do que 1986. A maior precipitação nos meses anteriores à imagem de satélite (período úmido) ocorreu em 2011. Indicativo da elevação dos valores de NDVI em 2011 comparado a 1986.

Sobre a temperatura do ar, a maior diferença entre os anos estudados foi no período seco, quando choveu mais em 1986 do que em 2011. Esta diferença encontrada no clima destes anos pode ser efeito de fenômenos de larga escala. Estes fenômenos são responsáveis por favorecer ou inibir a precipitação na América do Sul (Pavão et al., 2017).

A América do Sul mostra anomalias de precipitação associadas a eventos La Niña e El Niño (BOENING et al, 2012). O El Niño causa anos secos e o fenômeno La Niña é normalmente responsável por anos considerados normais ou chuvosos (FERREIRA & MELLO, 2005).

No Mato Grosso os meses de maio, junho, julho e agosto (final de outono e começo de inverno no hemisfério sul) são os que apresentam maior intensidade de influência dos fenômenos Niño(a) na quantidade de dias de chuva por ano (OLIVEIRA et al. 2015). O fenômeno El Niño que ocorreu entre 1986 e 1987 foi moderado, mas perdurou até o final de 1987. Nele houveram anomalias condições mais secas que a normal no nordeste da América do Sul durante o verão entre 1986 e 1987 (Kousky, 1987).

O fenômeno La Niña ocorrido entre 2010 e 2011 gerou uma série de mudanças significativas nos padrões de precipitação e temperatura em todo o planeta (KAYANO et al. 2016). O La Niña de 2011 e 2012 foi o pior em três décadas nordeste brasileiro, deixando a precipitação ainda menor do que costuma ser (RODRIGUES et al. 2014).

### **5.2. CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO**

A classificação de cobertura do solo obtida com o algoritmo teve conformidade com a cobertura do solo devido ao fato dos índices biofísicos se alterarem em conjunto com as características da superfície. As estimativas de acurácia, como o coeficiente Kappa (FIELDING & BELL, 1997), mostraram que a classificação de cobertura do

solo apresentou resultados nos maiores níveis de concordância com o índice Kappa (“substancial e quase perfeito”), mesmo utilizando de dados de SR de resolução espacial média (pixels de 30 por 30 metros). O que corrobora estudos que indicam o uso de imagens de satélite deste tipo são uma ferramenta eficaz para o mapeamento de mudanças de cobertura de solo (QUEIROZ, 2018; SHARMA & JOSHI, 2016; DISPERATI et al, 2015; SHARMA et al., 2013).

Os valores estimados para as imagens 1986 e 2011 foram superiores ao limite de confiabilidade para classificações do solo de 0,5 estabelecido por Fielding & Bell (1997). Além disso, a metodologia utilizada apresentou melhores resultados quando comparada à outras metodologias de classificação existentes que apresentavam menos parâmetros distinguindo cada classe (LIU et al. 2018; HASSAN 2017; OTTINGER et al. 2013).

Para Várzea Grande os menores valores de acurácia ocorreram devido à “mistura espectral” presente na classe BUP. A mistura está presente nesta cidade porque em sua maioria as porções residenciais da área urbana são áreas com baixa densidade de construções. Assim as cidades médias e pequenas são mais difíceis de classificar quando comparadas com metrópoles (SEXTON et al. 2013; SHARMA et al. 2013).

Em um pixel de 900 m<sup>2</sup> se tem várias coberturas, assim a assinatura do pixel na verdade é uma média das informações espectrais a que ele corresponde. Este problema é conhecido como “pixel mistura” é decorrente da resolução espacial do sensor do satélite e aumenta de acordo com o próprio tamanho do pixel da imagem. Quanto maior for o tamanho do pixel, maior também será a ocorrência de pixels mistura em imagens com padrão de cobertura complexo (MIRANDA, 2011).

Se nos bairros residenciais a presença de construções (telhados, concreto, asfalto) misturadas com solo exposto (ruas não asfaltadas e quintais sem vegetação) e vegetação esparsa ou rasteira (quintais e praças) reduziu a acurácia. Nas áreas centrais e densamente urbanizadas o oposto ocorre. Estas puderam ser adequadamente classificadas, pois quando o pixel contém apenas um tipo cobertura, estão armazenadas somente as características espectrais dessa cobertura do solo o que facilita sua classificação (MIRANDA, 2011).

Por isso as áreas cobertas por vegetação densa (FOR) também foram classificadas adequadamente, uma vez que a cobertura pela classe apresenta continuidade sendo maior ao tamanho dos pixels. Além disso, na imagem de 2011 o Kappa da classe FOR foi maior inclusive pelo contraste dos pixels com as áreas adjacentes onde ocorrem as coberturas modificadas pela ação antrópica. Em 1986 havia uma variedade de coberturas de vegetação em toda a área urbana, em 2011 predominaram as vegetações de alta densidade restritas às áreas de preservação ambiental.

A classe WAT que apresentou acurácia alta para ambos os anos. Uma característica inerente ao material, que possui um comportamento espectral muito distinto das outras coberturas do solo, fato que permite sua classificação ser realizada com apenas com o índice MNDWI com alta acurácia (SENAY et al. 2017; FISHER et al. (2016).

Durante um período de 25 anos a porção de área com construções se espalhou por uma área de aproximadamente 4,7 mil hectares. A porção urbanizada expandiu em quase todas as direções a partir da zona central da cidade. A cidade teve crescimento triplicado da sua população no período de 1980 a 2010 (IBGE, 2010; VÁRZEA GRANDE, 2006).

A expansão maciça da cidade (considerando as áreas cobertas por BAR e BUP) foi sob as áreas antes cobertas por vegetação (FOR e SHR). As porções cobertas com água apresentaram também um crescimento de área em 2011 com relação a 1986. Isto ocorreu devido ao aumento de áreas destinadas à piscicultura a partir de 1990 (Barros et al., 2011). Um dos fatores que contribuíram para este avanço foi a lei que disciplinou a piscicultura no estado publicada em 2006 (MATO GROSSO, 2006).

### **5.3. DINÂMICA DO NDVI, ALBEDO E TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE**

Os menores valores de NDVI estão presentes nas áreas urbanas densamente ocupadas ou em regiões de solo exposto e o oposto ocorre nas áreas com vegetação, onde há os maiores valores de NDVI (ALMEIDA et al., 2015). O mesmo padrão foi encontrado para o albedo, e o oposto para LST. Os maiores valores de temperatura de superfície foram para áreas urbanizadas e de solo exposto e as menores para áreas de vegetação densa (SOUZA et al., 2016).

Os corpos de água e a cobertura vegetal florestada são as áreas mais frescas em ambas as datas estudadas. Isto sugere a capacidade de mitigação da vegetação e dos corpos de água com relação a temperatura de superfície. As áreas densamente construídas formam “pontos quentes” dentro da área urbana e as densamente vegetadas formam “ilhas de frescor” (MATHEW et al. 2017; TIANGCO et al. 2008).

A temperatura de superfície em uma área vegetada é afetada tanto devido ao efeito de resfriamento pela disponibilidade de umidade, quanto pelo efeito da sombra das árvores na superfície próxima. Contudo, nas áreas urbanas como a porção vegetada tende ao mínimo, seu efeito sobre o clima urbano também tende ao mínimo (MATHEW et al. 2017; ZHOU et al. 2013; TIANGCO et al. 2008).

O mesmo obtivemos neste estudo onde as áreas densamente cobertas por materiais impermeáveis observam-se que a temperatura de superfície e o albedo menores que uma área de solo exposto. O solo exposto possui alta temperatura por efeitos da compactação que diminuem a infiltração e umidade; obtendo comportamento semelhante aos das construções que utilizam materiais impermeáveis (PU et al. 2006; SILVA et al. 2018).

O intervalo de confiança da LST das áreas alteradas por ação antrópica (BAR e BUP) se diferenciam estatisticamente das áreas de vegetação (FOR e SHR). Grande parte da área construída que surgiu através da substituição das classes de vegetação mostram temperaturas elevadas em 2011. A substituição das áreas de vegetação por áreas construídas ou de solo exposto são base para o fenômeno da ilha de calor urbana, pois estas áreas convertidas por ação antrópica apresentam temperaturas elevadas quando comparadas à floresta (SHARMA et al. 2013, FU & WENG 2016; SOUZA et al. 2016).

#### **5.4. FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA SUPERFÍCIE**

A impermeabilização do solo causada pela urbanização teve influência nos fluxos de energia e no saldo de radiação. E isto é um efeito que pode afetar o microclima das áreas alteradas (ALVES et al. 2017). Em 2011 os valores do fluxo de calor sensível (H) apresentaram alta variabilidade espacial e acompanharam os resultados de temperatura de superfície.

O fluxo de calor latente (Le) apresentou os maiores valores para os corpos d'água e área vegetadas, e menores valores para a construções e solo exposto (GOMES

et al. 2013). A diferença de  $120 \text{ W m}^{-2}$  para  $Le$  entre as classes FOR e BAR no ano de 2011 indicou a quantidade de energia disponível para ser utilizada pela vegetação.

A classe FOR devido à maior biomassa, possuem maior índice de vegetação, o que influencia diretamente no balanço de radiação. Isto acarreta variação no particionamento de energia destinada para calor sensível, latente e aquecimento do solo (BIUDES et al. 2015).

A distribuição da ET mostrou que os resultados acompanharam o padrão espacial dos resultados do fluxo de calor latente ( $Le$ ). Nesta pesquisa em Várzea Grande a situação observada foi distinta de outras devido à baixa disponibilidade de umidade característica do clima local no período. Assim os valores de evapotranspiração diária obtidos foram baixos, resultado da imagem de satélite se tratar do período mais seco da região, característico do tipo de clima Aw.

A diferença de evapotranspiração entre as classes FOR com BUP pode ser comparada com os valores de ET estimados em SILVA et al. (2018). O erro entre evapotranspiração estimada com o SEBAL e a equação de Penman Monteith foram inferiores ou iguais a  $1,00 \text{ mm.dia}^{-1}$  para dados Landsat 8. Considerando esta taxa de erro, mesmo assim estas classes ainda teriam diferença entre si, visto que ela é maior que  $1 \text{ mm.dia}^{-1}$ .

A zona do aeroporto, ZPA, apresentou albedo e LST elevados, mesmo apresentando um NDVI acima da zona central (ZC). De acordo com os resultados de correlação entre as variáveis, o albedo não é explicado ou explica a temperatura. O que se contrapõe à afirmação descrita por ANGELINI et al. (2015). Onde os autores indicaram para a capital Cuiabá que houve relação entre albedo e temperatura da superfície estimado por sensoriamento remoto. Possivelmente a diferença entre os resultados seja pelo comportamento bimodal da amostra utilizada neste estudo para Várzea Grande.

A cobertura do solo em ZPA é uma pista de concreto e o restante coberto por gramíneas cortadas ao mínimo, o que pode ser comparado a uma área extensa de solo exposto. Já a área da ZC é composta de estruturas verticais como lojas e prédios que possibilitam a radiação se difundir no meio.

## 5.5. EFEITO DA CONVERSÃO DA COBERTURA DO SOLO

Os locais de floresta foram convertidos para outras coberturas em sua maioria, mas foi indicado que havia maior disponibilidade de água para a vegetação em 2011. Isso corrobora o que foi mostrado no gráfico de precipitação (Figura 4). De acordo com as datas das imagens esperava-se que fossem encontrados os valores baixos de NDVI para Várzea Grande, pois são do período seco, característico da região central do Brasil (GURGEL et al. 2003).

O El Niño ocasiona a diminuição na precipitação na região central do Brasil, causando as maiores secas e maiores incêndios florestais (GURGEL, 2003). O NDVI apresentou uma queda acima da média, o que criou um cenário oposto no comportamento espectral da superfície entre as imagens de satélite analisadas. Uma com condições de seca acentuada (1986) e a outra imagem com efeitos de uma estação chuvosa anterior com maior precipitação (2011).

As classes de solo exposto e vegetação arbustiva apresentaram as maiores taxas de conversão para área construída, mas houve o aumento do NDVI de BAR e SHR devido às condições hídricas. Além disso, há o caso dos locais que em 1986 eram cobertos por solo exposto, onde seriam implementados loteamentos residenciais. Em 2011 houve o surgimento dos bairros arborizados, o que destacou mais a diferença no comportamento espectral entre os anos.

As médias de LST indicaram uma diferença de aproximadamente entre 10 e 12°C para os mesmos pontos avaliados em 1986 e 2011. Indicando que mesmo em condições de maior disponibilidade hídrica e com maior vigor da vegetação (NDVI) a diferença de temperatura foi grande entre as imagens. Resultado semelhante foi apresentado em outros trabalhos onde percebeu-se um nítido aumento dos valores de temperatura em períodos próximos ao avaliados neste trabalho (NASCIMENTO et al., 2011; CALLEJAS et al, 2011). Como no caso da área urbana de Campina Grande (PB) houve uma diferença de temperatura de 8 a 10 ° C entre 1984 e 2007 (CUNHA et al., 2009).

Com relação aos fluxos energéticos houve inversão das médias nas classes de cobertura do solo, aumento do H de 1986 para 2011 e diminuição do R<sub>n</sub>, Le e ET. Exceto para a classe WAT, que apresentou maior evapotranspiração em 2011. E isto

ocorreu mesmo com a situação de disponibilidade hídrica mais favorável em 2011 do que em 1986.

## 6. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada mostrou que a conversão de floresta em construções não provocou a diminuição do NDVI e o aumento do albedo. Entretanto, provocou o aumento da LST, H e diminuição do Rn, Le, ET como era esperado. Ou seja, parte da hipótese formulada foi negada.

O algoritmo de classificação de cobertura do solo gerado foi eficiente no mapeamento de classes de cobertura do solo. O mapeamento apresentou alto coeficiente de concordância Kappa, com valores acima de 0,76. O que foi possível mesmo com a área apresentando urbanização de baixa densidade.

A cobertura do solo se alterou no período de 1986 a 2011, sendo que classe floresta que perdeu 85% de área. E as áreas cobertas com construções se expandiram em detrimento das classes de solo exposto, vegetação arbustiva e floresta. Este crescimento ocorreu em todas as direções partindo do eixo central da Cidade, a avenida da FEB.

Em 2011 houve aumento do NDVI pela maior disponibilidade hídrica no solo. A temperatura de superfície teve aumento significativo em todas as classes de cobertura de 1986 para 2011. E os fluxos energéticos e evapotranspiração indicaram que a conversão da cobertura impactou no balanço de energia à superfície. Houve aumento do calor sensível e decréscimo em saldo de radiação, fluxo de calor latente e evapotranspiração.

Assim, pode-se concluir que a cidade de Várzea Grande passou por grandes alterações na cobertura do solo. E os efeitos da urbanização podem ser visualizados principalmente nas componentes do particionamento de energia e na temperatura de superfície.

## 7. SUGESTÕES

- i. Sugere-se para estudos posteriores o uso de imagens de satélite mais recentes. Para verificar o padrão da cobertura do solo atual e seus resultados sobre as variáveis do balanço de energia. Além disso, priorizar o uso de imagens com condições de maior normalidade entre si, ou seja, sem apresentar grandes diferenças na precipitação acumulada anual;
- ii. Para compreender melhor a dinâmica dos efeitos do crescimento populacional é fundamental o estudo da temperatura do ar com sensores localizados em pontos estratégicos na área urbana;
- iii. Pesquisas com objetivo de analisar variáveis que permitam reconhecer os efeitos da perda de área vegetada. Como, por exemplo, a dinâmica das trocas de CO<sub>2</sub> no cálculo do estoque de carbono relacionado a mudança da biomassa terrestre.
- iv. E estudos de ilhas de calor para Várzea Grande com o uso de imagens de satélite noturnas. Que permitem mapear a dinâmica de urbanização e sua relação com a população urbana.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J.M.H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 4011-4027, 2011.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT J.L.; BASTIAANSEN W. KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – applications. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007a.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE 133(4), 395-406, 2007b.

ALLEN, R.G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. **Surface Energy Balance Algorithms for Land**. Advance training and user's manual, version 1.0, pp.98, 2002.

ALMEIDA, A. D.; GUIMARÃES JUNIOR, S. A. M.; ANDRADE, E.; 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-SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, 2015.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711-728, 2013.

ALVES, L. E. R.; GOMES, H. B.; DOS SANTOS, M. N.; FREITAS, I. G. F. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**, 33, 117-127. 2017.

ANGELINI, L. P.; FAUSTO, M. A.; MÜTZENBERG, D. M.S.; NASSARDEN, D. C. S.; DANELICHEN, V. H.; MARQUES, H. O.; NADJA GOMES MACHADO, NOGUEIRA, J.S.; BIUDES, M. S. Relação entre albedo e temperatura da superfície estimados por sensoriamento remoto na área urbana de Cuiabá, Mato Grosso. **Anais**. In.: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, XVII. 2015, 1892-1898. 2015.

BARROS, M. P.; DE MUSIS, C. R. Análise Implicativa para Avaliar os Aspectos que Determinam a Preferência por Um Bairro: O Caso de Cuiabá, MT. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, 28, 198-225. 2013.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate**. 1995. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands. 272 p.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin Turkey. **Journal of Hydrology** 229: 87–100. 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions ASCE. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 131(1): 85–93. 2005.

BASTIAANSEN, W. G.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of hydrology**, 212, pp.198-212. 1998.

BIUDES, M. S.; VOULITIS, G. L.; MACHADO, N. G.; DE ARRUDA, P. H. Z.; NEVES, G. A. R.; LOBO, F. A.; NEALE, C. M. U.; NOGUEIRA, J. S. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.202, p.112–124, 2015.

BOENING, C.; WILLIS, J. K.; LANDERER, F. W.; NEREM, R. S.; FASULLO, J. The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 19, 2012.

BRASIL, I. B. G. E. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2017**. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS. IBGE. Rio de Janeiro. 2017.

BRASIL, I. B. G. E. Instituto Brasileiro de geografia e Estatística. **Censo demográfico**, v. 2010, 2010.

BRASIL, I. B. G. E. Instituto Brasileiro de geografia e Estatística. **Censo demográfico**. v. 1970, 1970.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C., OLIVEIRA, A. S. NOGUEIRA, M. C. D. J. A. USO DO SOLO E TEMPERATURA SUPERFICIAL EM ÁREA URBANA (relation between land use and land cover and superficial temperature in urban areas). *Mercator*, 10(23), 207-223. 2011.

CHANDER, G; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P. X.; YIN, Z. Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote sensing of environment**, v. 104, n. 2, p. 133-146, 2006.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. 2008. 2 ed. 183 p.

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

COX, E. P. **Interação entre clima e superfície urbanizada: o caso da cidade de Várzea Grande/MT**. 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2008.

CUNHA, J.E.D.B.L.; RUFINO, I. A. A.; IDEIÃO, S.M. A.; VELOSO, R.A. Determinação da temperatura de superfície na cidade de Campina Grande-PB a partir de imagens do satélite Landsat 5-TM. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 14, p. 5717-5724, 2009.

DAI, ZHAOXIN; GULDMANN, JEAN-MICHEL; HU, YUNFENG. Spatial regression models of park and land-use impacts on the urban heat island in central Beijing. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1136-1147, 2018.

DEILAMI, Kaveh; KAMRUZZAMAN, Md; HAYES, John. Correlation or causality between land cover patterns and the urban heat island effect? Evidence from Brisbane, Australia. **Remote Sensing**, v. 8, n. 9, p. 716, 2016.

DIAS, J. M.; SILVA, T.; CARVALHO, N.; MERGULHÃO, R.; VIEIRA, J. (2016). Proposta de agrupamento das cidades médias brasileiras para elaboração do plano de mobilidade urbana. **Anais**. VI congresso brasileiro de engenharia de produção. Ponta Grossa/PR.

DISPERATI, L.; VIRDIS, S. G. P. Assessment of land-use and land-cover changes from 1965 to 2014 in Tam Giang-Cau Hai Lagoon, central Vietnam. **Applied Geography**, v. 58, p. 48-64, 2015.

EFRON, B. The bootstrap and modern statistics. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 452, p. 1293-1296, 2000.

FENG, Y., LI, H.; TONG, X.; CHEN, L.; LIU, Y. Projection of land surface temperature considering the effects of future land change in the Taihu Lake Basin of China. **Global and planetary change**, v. 167, p. 24-34, 2018.

FERREIRA, A. G.; DA SILVA MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista brasileira de climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FIELDING, A. H.; BELL, J. F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Environmental conservation**, 24(01), 38-49. 1997.

FISHER, A.; FLOOD, N.; DANAHER, T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. **Remote Sensing of Environment**, v. 175, p. 167-182, 2016.

FU, P.; WENG, Q. A time series analysis of urbanization induced land use and land cover change and its impact on land surface temperature with Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, 175, 205-214, 2016.

GABOR, P.; JOMBACH, S. (2009). The relation between the biological activity and the land surface temperature in Budapest. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. 241-251, 2009.

GARCIA, S. M. N. P. **Os planos diretores e o planejamento urbano no aglomerado Cuiaba/Várzea Grande-MT**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2010.

GAUTAM, V. K.; GAURAV, P. K.; MURUGAN, P.; ANNADURAI, M. Assessment of surface water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and KT transformation. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 739-746, 2015.

GOMES, L. C. F.; DOS SANTOS, C. A. C.; DE ALMEIDA, H. A. (2013). Balanço de Energia à Superfície para a Cidade de Patos-PB Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 6(1), 015-028.

GURGEL, H. D. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.85-90, 2003.

HASSAN, M. M. Monitoring land use/land cover change, urban growth dynamics and landscape pattern analysis in five fastest urbanized cities in Bangladesh. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 7, p. 69-83, 2017.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R.; GARCIA, S. R.; CALHEIROS, A. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Revista Climanalise**. Edição Comemorativa, v. 30, p. 7-12, 2016.

LANDIS, J.R. KOCH, G. G. A medição da concordância do observador para dados categóricos. **Biometria**. 33:159-174, 1977.

LI, C., WANG, J., WANG, L., HU, L., & GONG, P. (2014). Comparison of classification algorithms and training sample sizes in urban land classification with Landsat thematic mapper imagery. **Remote Sensing**, 6(2), 964-983.

LIMA, J. G.; DA SILVEIRA, R. L. L. Cidades Médias Brasileiras a Partir de um Novo Olhar Denominal e Conceitual: Cidades de Comando Regional. **Desenvolvimento em Questão**, v. 16, n. 42, p. 8-41, 2017.

LIU, L.; ZHANG, Y. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong. **Remote Sensing**, v. 3, n. 7, p. 1535-1552, 2011.

LIU, X.; HU, G.; CHEN, Y.; LI, X.; XU, X.; LI, S.; PEI, F.; WANG, S. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, p. 227-239, 2018.

LUCENA, A. UMA ANÁLISE DE TÉCNICAS NOS ESTUDOS DE CLIMA URBANO PARA A REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO. **Geo UERJ**, (34), 40954, 2019.

MARTELLI, A.; SANTOS JÚNIOR, A. R. Arborização Urbana do município de Itapira–SP: perspectivas para educação ambiental e sua influência no conforto térmico. **REGET/UFSM**, v. 19, n. 2, p. 1018-31, 2015.

MARTIN, P.; BAUDOUIN, Y.; GACHON, P. An alternative method to characterize the surface urban heat island. **Int J Biometeorol**. v. 59, p. 849–861, 2015.

MATHEW, A.; KHANDELWAL, S.; KAUL, N. Investigating spatial and seasonal variations of urban heat island effect over Jaipur city and its relationship with vegetation, urbanization and elevation parameters. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 157-177, 2017.

MATHEW, A.; KHANDELWAL, S.; KAUL, N. Spatio-temporal variations of surface temperatures of Ahmedabad city and its relationship with vegetation and urbanization parameters as indicators of surface temperatures. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, p. 119-139, 2018.

MATO GROSSO. Decreto-Lei Estadual no 8.464, de 04 de abril de 2006. Superintendência da Imprensa Oficial do Estado de Mato Grosso Dispõe, define e disciplina a piscicultura no Estado de Mato Grosso e dá outras providências. **Diário Oficial de Mato Grosso**, Cuiabá, n. 23.468, p.1, 04 de abr. 2006.

MENENTI, M.; CHOUDHURY, B. J. Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. **Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales**, v. 212, p. 561-568, 1993.

MIRANDA, V.; PERES, L.; LUCENA, A. Climatology of the surface energy balance over the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ) based on remote sensing data. **EGU General Assembly Conference Abstracts**. p. 17384, 2018.

MOHANTA, K.; SHARMA, L. K. Assessing the impacts of urbanization on the thermal environment of Ranchi City (India) using geospatial technology. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 8, p. 54-63, 2017.

MORAES, E. T. I.; SILVA BEZERRA, P. E.; COSTA SOARES, I. R.; SANTOS PONTES, A. K. Análise da temperatura de superfície e do índice de vegetação no município de Belém na identificação das ilhas de calor. In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. **Anais**. 2017.

MOREIRA FILHO, J. C. C.; TAVARES JUNIOR, J. R. (2016). Avaliação da precisão temática de composições de NDBI, NDVI, NDWI. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 4, n. 1, p. 3-14, 2016.

MOTTA, D.; MATA, D. Crescimento das cidades médias. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. **Revista Desafios**. 2008.

NASCIMENTO, D. T. F.; DE 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.

OLIVEIRA, J.H. D. **Transformações socioespaciais em Várzea Grande-MT: entre negócios urbanos e remoções de famílias no contexto da realização da Copa do Mundo de 2014**. 2016. 120p. Dissertação. Programa de PósGraduação em Geografia. Departamento de Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso. 2016.

OLIVEIRA, N. L.; MARCUZZO, F. F. N.; GONÇALVES BARROS, R. Influência do El Niño e La Niña no número de dias de precipitação pluviométrica no Estado do Mato Grosso. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, 2015.

OTTINGER, M.; KUENZER, C.; LIU, G.; WANG, S.; DECH, S. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. **Applied Geography**, v. 44, p. 53-68, 2013. MIRANDA, 2011

PAIVA, C. M.; FRANCA, G. B.; LIU, W. T. H.; ROTUNNO FILHO, O. C. A comparison of experimental energy balance components data and SEBAL model results in Dourados, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 6, p. 1731-1745, 2011.

PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; PAVÃO, L. L.; DA SILVA QUERINO, J. K. A.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Variação espacial e temporal do saldo de radiação superficial em uma área do sul do Amazonas, brasil. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, 37, 333-352. 2016.

PU, R.; GONG, P.; MICHISHITA, R.; SASAGAWA, T. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval. **Remote Sensing of Environment**, 104(2), 211-225. 2006.

QGIS, DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System, versão 2.18**. Open Source Geospatial Foundation Project.

QIN, Z.; KARNIELI, A.; & BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **International Journal of Remote Sensing**, 22(18), 3719-3746. 2001.

QUEIROZ, T. B.; SOUSA, R. D. S.; BALDIN, T.; BATISTA, F. D. J.; MARCHESAN, J.; PEDRALI, L. D.; PEREIRA, R. S. (2018) Avaliação do desempenho da classificação do uso e cobertura da terra a partir de imagens Landsat 8 e Rapideye na região central do Rio Grande do Sul. **Geociências (São Paulo)**, v. 36, n. 3, p. 569-578, 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R versão 3.5.3.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RIBEIRO, H. J.; OLIVEIRA, W. N.; SIQUEIRA, R. V.; DE OLIVEIRA, A. W. N.; DE OLIVEIRA, V. T.; KM, R. G. S. N. Estimativa da evapotranspiração diária para diferentes usos do solo utilizando imagens do Satélite Landsat 5. **Anais. 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Jardim/MS. Embrapa Informática Agropecuária/INPE.** 2018. p. 513-522.

RODRIGUES, R. R.; MCPHADEN, M. J. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 3, p. 1012-1018, 2014.

ROMANCINI, S. R. Territórios informais da prostituição: estudo de caso das travestis da avenida da Feb em Várzea Grande–MT. **Ateliê Geográfico**, v. 11, n. 1, p. 277-295.

SAFARRAD, T.; MANSOURINIA, M.; ENTEZAMI, H. Radiation balance and urban land use (case study: Kermanshah city). **Journal of Geographical Sciences**. 19:217-231, 2019.

SANNIGRAHI, S.; BHATT, S.; RAHMAT, S.; UNİYAL, B.; BANERJEE, S.; CHAKRABORTI, S.; JHA, S.; LAHIRI, S.; SANTRA, K.; BHATT, A. (2018). Analyzing the role of biophysical compositions in minimizing urban land surface temperature and urban heating. **Urban climate**, v. 24, p. 803-819, 2018.

SANTOS, Valmir Aparecido Ferreira dos. O aeroporto de Cuiabá na história regional: do “Campo Velho” ao novo aeroporto de Cuiabá em Várzea Grande (1929-1969) Dissertação (Mestrado em História). UFMT. Cuiabá, 188 p. 2013.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; FRIEDRICHS, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98-112, 2017.

SEXTON, J. O.; URBAN, D. L.; DONOHUE, M. J.; SONG, C. Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 246-258, 2013.

SHARMA, R.; GHOSH, A.; JOSHI, P. K. Spatio-temporal footprints of urbanisation in Surat, the Diamond City of India (1990–2009). **Environ Monit Assess** (2013) 185:3313–3325.

SHARMA, RICHA; JOSHI, P. K. Mapping environmental impacts of rapid urbanization in the National Capital Region of India using remote sensing inputs. **Urban Climate**, v. 15, p. 70-82, 2016.

SILVA, B. B. D.; MERCANTE, E.; BOAS, M. A. V.; WRUBLACK, S. C.; OLDONI, L. V. Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. **Revista Ciência Agronômica**, 49(2), 221-227, 2018a.

SILVA, D. A. O.; SILVA, T. S. S.; SILVA, J. L. B.; LOPES, I.; SILVA, A. C. F.; SANTOS, C. G. Impacto da alteração do uso do solo usando dados orbitais no baixo São Francisco. Revista Ambientale. **Revista da Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL**. Vol.10, nº 3 2018b.

SOUZA, J. F. DE; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB. **Ambiente Construído** v. 16, n. 1, p. 21-37, jan./mar. 2016.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and earth system sciences**, v. 6, n. 1, p. 85-100, 2002.

SUN, Y.; YANG, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Z. Assessing vegetation dynamics and their relationships with climatic variability in northern China. **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, v. 87, p. 79-86, 2015.

TAVARES, José Wilson. **Várzea Grande: história e tradição**. Ed. KCM. 2011. 158p.

TIANGCO, M.; LAGMAY, A. M. F.; ARGETE, J. (2008). ASTER-based study of the night-time urban heat island effect in Metro Manila. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 10, p. 2799-2818, 2008.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, **Population Division World Urbanization Prospects: The 2014 Revision 2015** (ST/ESA/SER.A/366).

VÁRZEA GRANDE, 2012. Lei Complementar n. 3.727 publicado em 16 de fevereiro de 2012. Zoneamento de Uso e Ocupação do Solo Urbano do Município de Várzea Grande e dá outras providências. 26 p. Fevereiro de 2012.

VÁRZEA GRANDE, MT. **Plano Diretor Participativo do Município de Várzea Grande, MT: 2007-2017**. Volume II, p.179. 2007.

VILARINHO NETO, C. S. A Metropolização regional: formação e consolidação da rede urbana do Estado de Mato Grosso. Cuiabá: EdUFMT, 2009.

ZHANG, T.; CHEN, Y. Application of Different Remote Sensing Evapotranspiration Estimate Models in Urban Agglomeration Areas. **AGU Fall Meeting Abstracts**. 2018.

ZHOU, J.; CHEN, Y.; ZHANG, X.; ZHAN, W. Modelling the diurnal variations of urban heat islands with multi-source satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 21, p. 7568-7588, 2013.