



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Protocolo metodológico para obtenção dos valores de radiância, emissividade e temperatura de superfície de imagens Landsat 8 utilizando LEGAL

João Pedro Ocanha Krizek¹, Luciana Cavalcanti Maia Santos²

¹ Graduado em Ciências Biológicas, pesquisador do Grupo de Pesquisa Interdisciplinar em Meio Ambiente, Ensino, Tecnologia e Cidade (AMBIENTEC), Departamento de Ciências e Matemática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – *Campus* São Paulo, R. Pedro Vicente, 625, CEP 01109-010, Canindé, São Paulo, SP. (11) 2763-7520. jpokrizek@gmail.com ² Coordenadora de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação, Profa. Dra. Efetiva, Líder do AMBIENTEC, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – *Campus* Pirituba, Av. Mutinga, 951, CEP 05110-000, Jardim Santo Elias, São Paulo, SP. (11) 2504-0100. santos.lucianacm@gmail.com

Artigo recebido em 03/08/2022 e aceito em 05/09/2022

RESUMO

Considerando-se a importância do sensoriamento remoto térmico, pesquisadores vêm atuando no desenvolvimento de diversos algoritmos que contribuam na determinação da temperatura de superfície com a utilização de dados orbitais. Tais algoritmos podem ser utilizados em estudos que objetivam avaliar o fenômeno de ilha de calor urbana, em estudos de microclimas habitacionais, no entendimento térmico do fluxo de energia em paisagens urbanas e para a compreensão da interação da temperatura superficial com diferentes alvos de superfície terrestre. Diante do exposto, o objetivo deste artigo é o de divulgar um protocolo metodológico para obtenção dos valores reais de temperatura de superfície de imagens Landsat 8, a partir da criação de algoritmos em LEGAL e, dessa forma, possibilitar a replicação e execução de outras pesquisas que visem à obtenção desses dados através do SPRING, um *software* brasileiro gratuito e de livre acesso. A elaboração deste protocolo é justificada pela quase completa ausência de trabalhos que descrevam a obtenção da temperatura de superfície e outros parâmetros físicos (radiância, reflectância, emissividade) ou ecológicos (NDVI, SAVI, IAF) através do SIG mencionado. Trata-se de um protocolo inédito, que poderá constituir base de referência para pesquisadores, estudantes e gestores não familiarizados com o desenvolvimento de algoritmos, mas que visem à obtenção correta e adequada de dados de sensoriamento remoto térmico. Também fica evidenciado que é extremamente viável a utilização de ambientes livres para trabalhos com álgebras de mapas, ambientes estes que podem demonstrar robustez de processamento igual a versões de *softwares* pagos.

Palavras-chave: radiância, reflectância, índices de vegetação, emissividade de superfície, SPRING.

Methodological protocol for obtaining radiance, emissivity, and surface temperature values from Landsat 8 images using LEGAL

ABSTRACT

Given the importance of thermal remote sensing, researchers have been working on the development of algorithms that contribute to the determination of surface temperature using orbital data. Such algorithms can be used in studies that evaluate the urban heat island phenomenon, in microclimate studies, in the thermal understanding of energy flow in urban landscapes, and the understanding of the interaction of surface temperature with different targets on the earth's surface. Thus, the current article proposes a methodological protocol to obtain the real values of the surface temperature of Landsat 8 images through algorithms in LEGAL and, in this way, to enable the replication and execution of other studies that obtain these data through the SPRING, free and open-access software. The elaboration of this protocol is justified by the absence of works describing the attainment of surface temperature and other physical parameters (radiance, reflectance, emissivity) or ecological parameters (NDVI, SAVI, LAI) through the mentioned GIS. This is an unprecedented protocol, which can be a reference for researchers, students, and managers unfamiliar with the development of algorithms, but who want to obtain correct and adequate maps of thermal remote sensing. It is also evident that it is extremely viable to use free environments to work with map algebra, environments that can demonstrate processing robustness equal to paid versions of software.

Keywords: radiance, reflectance, vegetation indices, surface emissivity, SPRING.

Obtenção das Imagens Landsat 8

As imagens Landsat 8 podem ser obtidas gratuitamente no site do INPE, através do endereço eletrônico:

<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

Nele, imagens de satélites podem ser pesquisadas com base na cobertura máxima de nuvens, órbita e ponto, municípios e coordenadas geográficas, por exemplo.

Equações utilizadas no protocolo

Conforme exposto por Chander e Markham (2003), o cálculo da **radiância** é um passo fundamental para transformar os dados brutos das imagens de vários sensores em uma escala radiométrica comum, que pode ser utilizada para, entre outros casos, a posterior obtenção de valores de temperatura de superfície. Desse modo, para a conversão dos números digitais de uma banda específica em radiância, pode ser utilizada a Equação 1, disponibilizada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2019):

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

onde L_{λ} é o valor da radiância espectral, em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; M_L é fator multiplicativo de redimensionamento específico por banda e obtido a partir do arquivo metadados (RADIANCE_MULT_BAND_ x , onde x é o número da banda); Q_{cal} é o produto quantificado e calibrado para números digitais (ND) – i.e., este valor se refere a cada uma das bandas da imagem; A_L é fator aditivo de redimensionamento específico por banda e obtido a partir do arquivo metadados (RADIANCE_ADD_BAND_ x , onde x é o número da banda).

Assim como a radiância, o cálculo da **reflectância** converte os números digitais brutos de uma imagem em uma escala radiométrica real, a qual pode ser utilizada para o cálculo posterior de índices de vegetação (Krizek e Santos, 2021). Desse modo, a reflectância pode ser obtida através da Equação 2 (USGS, 2019):

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} \cdot Q_{cal} + A_{\rho}}{\sin(\theta_{se})} \quad (2)$$

onde ρ_{λ} é o valor da reflectância, com correção por ângulo solar; M_{ρ} é o coeficiente multiplicativo de reflectância específico por banda e obtido a partir do arquivo metadados (REFLECTANCE_MULT_BAND_ x , onde x é o

número da banda); Q_{cal} é o produto quantificado e calibrado para números digitais (ND); A_{ρ} é o coeficiente aditivo de reflectância específico por banda e obtido a partir do arquivo metadados (REFLECTANCE_ADD_BAND_ x , onde x é o número da banda) e θ_{se} o ângulo de elevação solar, obtido a partir do arquivo metadados da imagem (SUN_ELEVATION).

Após a determinação dos valores de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, pode-se então calcular os diferentes índices de vegetação.

O **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse et al. (1973), é um índice amplamente utilizado até os dias atuais para construir perfis temporais e sazonais das atividades da vegetação. Esse índice de vegetação é obtido através da Equação 3:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (3)$$

onde $NDVI$ é o índice de vegetação por diferença normalizada; ρ_{IVP} é o valor da reflectância na banda do infravermelho próximo e ρ_V é o valor da reflectância na banda do vermelho.

A partir do NDVI, pode-se determinar o **SAVI** (*Soil Adjusted Vegetation Index*). De acordo com o trabalho de Huete et al. (1985), a sensibilidade dos índices de vegetação em relação ao solo é maior em dosséis que apresentam níveis médios (50%) de cobertura vegetal verde. Por isso, Huete (1988) introduziu ao NDVI a constante “ L ”, que atua minimizando o efeito do solo no resultado final do índice. Assim, a fórmula para o cálculo do SAVI pode ser obtida na Equação 4:

$$SAVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)(1 + L)}{(\rho_{IVP} + \rho_V + L)} \quad (4)$$

onde $SAVI$ é o índice de vegetação ajustado para o solo; ρ_{IVP} é o valor da reflectância na banda do infravermelho próximo; ρ_V é o valor da reflectância na banda do vermelho e L é a constante de minimização do efeito do solo, podendo variar de 0 a 1.

De acordo com Huete (1988), os valores indicados de L são: $L = 1$ para densidades baixas de cobertura vegetal; $L = 0,5$ para densidades médias de cobertura vegetal; $L = 0,25$ para densidades altas de cobertura vegetal. Apesar disso, considerar $L = 0,5$ já oferece, por si só, um índice espectral superior ao NDVI para um amplo intervalo de condições de vegetação. Entretanto, ainda existe a necessidade desse valor ser analisado para

diferentes biomas e ambientes agrícolas (Huete, 1988).

O terceiro índice de vegetação empregado nos modelos *SEBAL/METRIC* é o **LAI** (*Leaf Area Index* ou **IAF**, Índice de Área Foliar), o qual representa a área foliar total por unidade de área. De acordo com Allen et al. (2007), esse índice pode ser obtido através do SAVI a partir da Equação 5:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (5)$$

onde *IAF* é o índice de área foliar e *SAVI* é o índice de vegetação ajustado para o solo.

Após a obtenção do IAF, pode-se então calcular a **emissividade de superfície** através da equação de Plank invertida, proposta para um corpo negro. Segundo Waters et al. (2002), usa-se a Equação 6 para computar a emissividade de superfície quando NDVI > 0 e IAF < 3:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 * IAF \quad (6)$$

onde ε_{NB} é a emissividade de superfície correspondente à banda de comprimento de onda do sensor térmico do satélite e *IAF* é o índice de área foliar. Nos casos em que $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = 0,98$. Já para os corpos hídricos, situação em que NDVI ≤ 0, $\varepsilon_{NB} = 0,99$ (Waters et al., 2002).

Finalmente, a **temperatura superficial** é calculada pela aplicação da Equação 7, a qual leva em consideração os valores da radiância espectral da banda termal (Equação 1) e da emissividade de superfície (Equação 6):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (7)$$

onde T_s é a temperatura de superfície, em K; L_λ é o valor da radiância espectral, em W/(m².sr.μm); ε_{NB} é a emissividade de superfície; K_1 é a constante de calibração 1 específica da banda termal e obtida a partir do arquivo metadados (K1_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda); K_2 é a constante de calibração 2 específica da banda termal e obtida a partir do arquivo metadados (K2_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda).

Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico¹

A álgebra de mapas é implementada, no SPRING, através da LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), uma linguagem de consulta e manipulação espacial que realiza operações sobre dados dos tipos MAPA TEMÁTICO, MODELO NUMÉRICO DE TERRENO e IMAGEM (INPE, 2019). LEGAL teve sua implementação a partir do trabalho de Câmara (1995) e é estruturada por uma lista de sentenças que descreve um procedimento. Um programa em LEGAL é estruturado em três partes: declarações, instanciações e operações (INPE, 2019).

Nas sentenças de declaração, definem-se os dados. Cada plano de informação (PI) a ser manipulado é declarado explicitamente, dando-lhe um nome e associando-o à sua categoria no esquema conceitual, obedecendo a seguinte sintaxe:

`<Modelo><var> (<categoria>);2`

O campo `<Modelo>` deve ser substituído pelo modelo de dados correspondente, tal como Temático, Numérico ou Imagem. O campo `<var>` deve ser substituído pelo nome da variável associada ao PI e o campo `<categoria>` identifica a categoria a qual o dado pertence.

Nas sentenças de instanciação, recuperam-se os dados existentes do banco de dados ou criam-se os novos PI. Um novo PI pode então ser associado ao resultado de operações em LEGAL. Tais operações são realizadas através dos operadores *Recupere* e *Novo*. *Recupere* associa uma variável a um PI existente no banco de dados geográfico. *Novo* cria um novo PI no banco de dados e requer parâmetros que dependem da representação geométrica associada. Abaixo segue a estrutura de uma sentença que recupera dados:

`<var> = Recupere (Nome = "<PI>");`

O campo `<var>` deve ser substituído pelo nome da variável e o campo `<PI>` deve ser substituído pelo nome do plano de informação que será associado a essa variável.

Por fim, nas sentenças de operação, realizam-se as operações da álgebra de mapas.

¹ Tópico retirado de Krizek e Santos (2021).

²As sentenças em LEGAL são escritas neste artigo em Courier New, 10.

Abaixo segue um exemplo de operação para obtenção do NDVI:

$$\text{NDVI} = \text{Numerico} ((B5-B4) / (B5+B4));$$

No presente trabalho, a LEGAL foi utilizada para a criação de sete algoritmos: (1) algoritmo para a obtenção dos valores reais de radiância da banda do infravermelho termal; (2) algoritmo para a obtenção dos valores reais de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo; (3) algoritmo para o cálculo do NDVI; (4) algoritmo para o cálculo do SAVI; (5) algoritmo para o cálculo do IAF; (6)

algoritmo para o cálculo da emissividade térmica; (7) algoritmo para a obtenção da temperatura de superfície.

A funcionalidade de cada algoritmo aqui proposto foi testada e comprovada a partir de sua aplicação em uma “imagem-teste” selecionada. Para isso, foi utilizada uma imagem Landsat 8 datada de 30 de agosto de 2018, com resolução espacial de 30 m e resolução radiométrica de 12 bits. A área imageada tem como par de coordenadas geográficas: 47°08' W – 23°50'S e 46°17' W – 22°41' S, abarcando a Região Noroeste da Cidade de São Paulo (Figura 2).

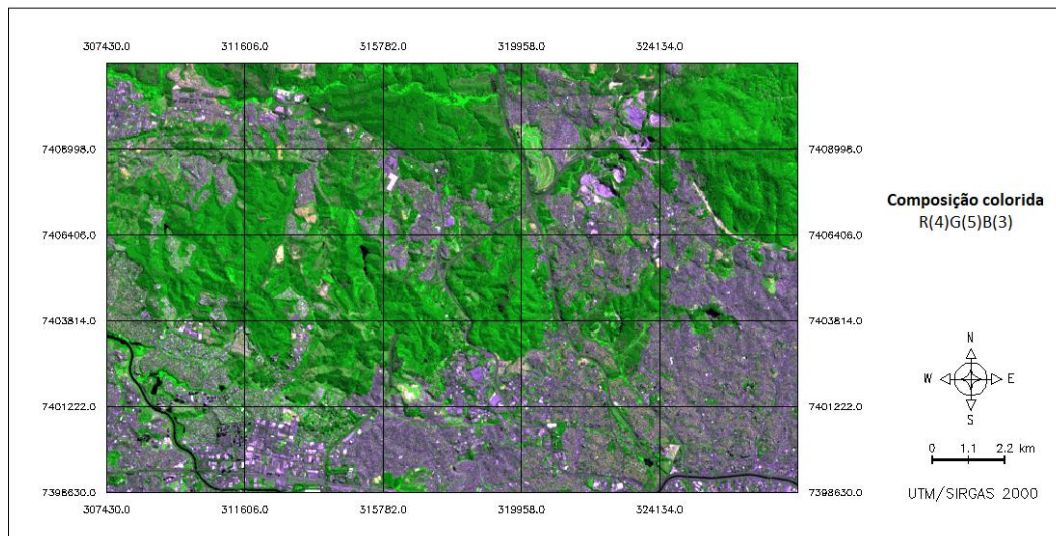


Figura 2. Composição colorida R(4)G(5)B(3) da imagem-teste utilizada para aplicação dos algoritmos desenvolvidos.

Resultados e discussão

Algoritmo para Obtenção da Radiância

A Figura 3 descreve um algoritmo em LEGAL gerado no SPRING. A partir dele é possível converter os ND de qualquer imagem Landsat 8/OLI em valores reais de radiância espectral. Na linha 3, é importante que o usuário troque “Landsat8” pelo nome atribuído à categoria em seu banco de dados no qual se encontra o plano de informação referente à banda do infravermelho termal (banda 10). Da mesma forma, o usuário deve alterar a linha 13, de modo a recuperar o plano de informação com base no nome em que ele está registrado no seu banco de dados. Os valores atribuídos às variáveis reais (linhas 9-10) podem ser obtidos no arquivo metadados da

imagem utilizada. Os valores de ResX, ResY, e Escala podem ser obtidos no próprio SPRING: com o projeto ativo e a respectiva banda selecionada, clica-se em “Editar” e, em seguida, “Plano de Informação...”.

Antes da execução do algoritmo, é necessário também que o usuário crie manualmente uma nova categoria, intitulada “Radiância”, pertencente a um modelo numérico de terreno (MNT). Também se destaca que as linhas 2, 6, 8, 12, 15, e 18 (Figura 3), com fonte colorida em verde, representam comentários que foram inseridos por uma questão explicativa – e, desta forma, podem ser omitidos do algoritmo sem perda funcional.

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Imagem banda10 ("Landsat8");
4 Numerico radiancia10 ("Radiancia");
5
6 //Instaciação de variáveis
7
8 //Valores obtidos no arquivo metadados
9 radianceMultBanda10 = 3.3420 * (10^(-04));
10 radianceAddBanda10 = 0.100000;
11
12 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
13 banda10 = Recupere (Nome = "b10_Recorte");
14
15 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
16 radiancia10 = Novo (Nome = "radiancia_b10", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
17
18 //Operação de conversão dos números digitais em radiância
19 radiancia10 = Numerico (radianceMultBanda10 * banda10 + radianceAddBanda10);
20 }

```

Figura 3. Algoritmo em LEGAL para a obtenção dos valores de radiância espectral.

Algoritmo para Obtenção da Reflectância

A Figura 4 descreve um algoritmo em LEGAL que permite converter os ND de qualquer imagem Landsat 8/OLI em valores reais de reflectância, com a devida correção atmosférica. Na linha 3, assim como no algoritmo anterior, é importante que o usuário troque “Landsat8” pelo nome atribuído à categoria em seu banco de dados nas quais se encontram os planos de informação referentes às bandas do vermelho (banda 4) e do infravermelho próximo (banda 5). Da mesma forma, o usuário deve alterar as linhas

16 e 17, de modo a recuperar os planos de informação com base no nome em que eles estão registrados no seu banco de dados. Os valores atribuídos às variáveis reais (linhas 9-13) são facilmente obtidos no arquivo metadados da imagem utilizada. Também se ressalta que, antes da execução do algoritmo (Figura 4), é necessário que o usuário crie manualmente uma nova categoria, intitulada “Reflectancia”, pertencente a um modelo numérico de terreno (MNT) (Krizek e Santos, 2021).

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Imagem banda4, banda5 ("Landsat8");
4 Numerico reflectancia4, reflectancia5 ("Reflectancia");
5
6 //Instaciação de variáveis
7
8 //Valores obtidos no arquivo metadados
9 reflectanceMultBanda4 = 2 * (10^(-05));
10 reflectanceMultBanda5 = 2 * (10^(-05));
11 reflectanceAddBanda4 = -0.100000;
12 reflectanceAddBanda5 = -0.100000;
13 sunElevation = 46.11727539;
14
15 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
16 banda4 = Recupere (Nome = "b4_Recorte");
17 banda5 = Recupere (Nome = "b5_Recorte");
18
19 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
20 reflectancia4 = Novo (Nome = "reflectancia_b4", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
21 reflectancia5 = Novo (Nome = "reflectancia_b5", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
22
23 //Operação de conversão dos números digitais em reflectância
24 reflectancia4 = Numerico ((reflectanceMultBanda4 * banda4 + reflectanceAddBanda4) / sin(sunElevation));
25 reflectancia5 = Numerico ((reflectanceMultBanda5 * banda5 + reflectanceAddBanda5) / sin(sunElevation));
26 }

```

Figura 4. Algoritmo em LEGAL para a obtenção dos valores de reflectância espectral.

Algoritmo para Obtenção do NDVI

A figura 5 descreve um algoritmo em LEGAL para obtenção da imagem NDVI a partir dos valores de reflectância obtidos anteriormente (Figura 4). Antes da execução do algoritmo (Figura 5), é necessário que o usuário crie manualmente

uma nova categoria, intitulada “Vegetacao”, pertencente a um modelo numérico de terreno (MNT), a qual será associado o plano de informação referente à imagem NDVI (Krizek e Santos, 2021).

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Numerico reflectancia4, reflectancia5 ("Reflectancia");
4 Numerico ndvi ("Vegetacao");
5
6 //Instaciação de variáveis
7
8 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
9 reflectancia4 = Recupere (Nome = "reflectancia_b4");
10 reflectancia5 = Recupere (Nome = "reflectancia_b5");
11
12 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
13 ndvi = Novo (Nome = "ndvi", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
14
15 //Operação de obtenção do NDVI
16 ndvi = ((reflectancia5 - reflectancia4) / (reflectancia5 + reflectancia4));
17 }

```

Figura 5. Algoritmo em LEGAL para a obtenção da imagem NDVI.

Algoritmo para Obtenção do SAVI

A figura 6 descreve um algoritmo em LEGAL para obtenção da imagem SAVI a partir dos valores de reflectância obtidos anteriormente (Figura 4). Ressalta-se que, na linha 13 (Figura 6), atribuiu-se à constante de minimização do efeito do

solo (L) o valor de 0,5; todavia, o valor de L pode ser alterado de acordo com as preferências do pesquisador/analista, conforme mencionado anteriormente.

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Numerico reflectancia4, reflectancia5 ("Reflectancia");
4 Numerico savi ("Vegetacao");
5
6 //Instaciação de variáveis
7
8 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
9 reflectancia4 = Recupere (Nome = "reflectancia_b4");
10 reflectancia5 = Recupere (Nome = "reflectancia_b5");
11
12 //Especificação da constante de minimização do efeito do solo
13 L = 0.5;
14
15 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
16 savi = Novo (Nome = "savi", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
17
18 //Operação de obtenção do SAVI
19 savi = (((reflectancia5 - reflectancia4) * (1 + L)) / (reflectancia5 + reflectancia4 + L));
20 }

```

Figura 6. Algoritmo em LEGAL para a obtenção da imagem SAVI.

Algoritmo para Obtenção do IAF

A figura 7 descreve um algoritmo em LEGAL para obtenção da imagem IAF a partir dos valores do SAVI (Figura 6).

O IAF não tem unidade porque é uma proporção de áreas. Por exemplo, um dossel com IAF = 1 tem uma proporção de 1:1 de área foliar para área de solo. Um dossel com IAF = 2 tem uma proporção de 2:1 de área foliar para área de solo. Globalmente, o IAF é altamente variável: alguns ecossistemas desérticos têm IAF < 1, enquanto as florestas tropicais mais densas podem ter IAF de até 9 (Berger et al., 2019; Lin et al., 2021). Apesar de, na vida real, o IAF sempre ser ≥ 0 , o cálculo do IAF a partir de dados de sensoriamento remoto

pode levar a obtenção de valores negativos. Tais valores negativos de IAF (IAF < 0), calculados a partir do SAVI, podem ser ocasionados por várias características inerentes aos *pixels*, como influência dos solos, interferência atmosférica, propriedades espectrais dos alvos, bem como erros de ajuste da equação (Berger et al., 2019). É por esse motivo que, na linha 15 (Figura 7) aparece um condicional que analisa *pixel a pixel* da imagem IAF e extrai a condição que: se no *pixel* o IAF é maior que 0, então se mantém o valor de IAF, caso contrário, considera-se que o IAF = 0, evitando-se o registro de IAF negativo.

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Numerico iaf, savi ("Vegetacao");
4
5 //Instaciação de variáveis
6
7 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
8 savi = Recupere (Nome = "savi");
9
10 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
11 iaf = Novo (Nome = "iaf", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
12
13 //Operação de obtenção do índice de área foliar
14 iaf = -(log((0.69 - savi)/0.59))/0.91;
15 iaf = (iaf > 0) ? iaf : 0; //Considera que os valores negativos de IAF devem ser considerados 0 (zero)
16 }

```

Figura 7. Algoritmo em LEGAL para a obtenção da imagem IAF.

Algoritmo para Obtenção da Emissividade

A figura 8 descreve um algoritmo em LEGAL para obtenção da imagem de emissividade térmica de superfície, calculada a partir dos valores de IAF (Figura 7).

Para cumprir todas as condições exigidas para se calcular a emissividade, duas condicionais

são expressas nas linhas 15 e 16, que especificam que quando $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = 0,98$, e que quando $NDVI \leq 0$, $\epsilon_{NB} = 0,99$. Nos demais casos (quando $IAF < 3$ e $NDVI > 0$), $\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 * IAF$.

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Numerico emissividade, iaf, ndvi ("Vegetacao");
4
5 //Instaciação de variáveis
6
7 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
8 iaf = Recupere (Nome = "iaf");
9 ndvi = Recupere (Nome = "ndvi");
10
11 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
12 emissividade = Novo (Nome = "emissividade", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
13
14 //Operação de obtenção da emissividade
15 emissividade = (iaf >= 3) ? 0.98 : (0.97 + 0.0033 * iaf);
16 emissividade = (ndvi <= 0) ? 0.99 : emissividade;
17 }

```

Figura 8. Algoritmo em LEGAL para a obtenção dos valores de emissividade térmica.

Algoritmo para Obtenção da Temperatura de Superfície

A figura 9 descreve um algoritmo em LEGAL para a obtenção dos valores de temperatura de superfície de imagens Landsat 8, calculados a partir dos valores de radiância (Figura 3) e emissividade térmica de superfície (Figura 8). Os valores atribuídos às variáveis reais (linhas 10-11) são facilmente obtidos no arquivo metadados da imagem utilizada. Antes da execução do

algoritmo (Figura 9), é necessário que o usuário crie manualmente uma nova categoria, intitulada “Temperatura”, pertencente a um modelo numérico de terreno (MNT), a qual serão associados os planos de informação referentes às imagens obtidas. A temperatura de superfície, expressa em graus Kelvin e graus Celsius, é calculada através das equações presentes nas linhas 22 e 23, respectivamente.

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Numerico radiancia ("Radiancia");
4 Numerico emissividade ("Vegetacao");
5 Numerico temperaturakelvin, temperaturacelsius ("Temperatura");
6
7 //Instaciação de variáveis
8
9 //Valores obtidos no arquivo metadados
10 k1 = 774.89;
11 k2 = 1321.08;
12
13 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
14 radiancia = Recupere (Nome = "radiancia_b10");
15 emissividade = Recupere (Nome = "emissividade");
16
17 //O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
18 temperaturakelvin = Novo (Nome = "temperatura_kelvin", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
19 temperaturacelsius = Novo (Nome = "temperatura_celsius", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000);
20
21 //Operação de obtenção da temperatura em °Celsius
22 temperaturakelvin = (k2 / (log((emissividade * k1) / radiancia) + 1));
23 temperaturacelsius = temperaturakelvin - 273.15;
24 }

```

Figura 9. Algoritmo em LEGAL para a obtenção dos valores de temperatura de superfície.

Teste dos algoritmos

Como resultado do algoritmo apresentado anteriormente na figura 3, a figura 10 é um mapa da distribuição da radiancia da banda 10 (infravermelho termal) exemplificado para a imagem-teste utilizada. A radiancia é a medida da densidade de fluxo radiante que deixa um elemento de área da superfície do terreno, e que se propaga em uma direção definida por um cone elementar de um ângulo sólido contendo aquela direção (Meneses e Almeida, 2012).

As figuras 11 e 12 são mapas da distribuição da reflectância para a imagem-teste utilizada, respectivamente para as bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo), a partir da aplicação do algoritmo apresentado na figura 4. A reflectância (expressa em porcentagem) é a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (radiancia) pela quantidade de energia incidente naquela área (irradiância), no mesmo instante de tempo (Meneses e Almeida, 2012; Zeng et al., 2022). De acordo com Gates et al. (1965), os três principais fatores que influenciam na quantidade de energia eletromagnética refletida pela vegetação são: (a) pigmentos; (b) espaços ocupados pela água e pelo ar; e (c) estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente, como núcleo, mitocôndrias, ribossomos, grãos de amido, entre outras. Conforme é possível observar (Figura 11), na banda 4 (vermelho) as áreas vegetadas apresentam tonalidades mais escuras, o que indica reflectância mais baixa; por analogia, pode-se dizer que a absorção é maior. Já na banda 5 (infravermelho próximo) (Figura 12), as áreas vegetadas apresentam reflectância mais alta. Isso

acontece porque, devido às propriedades do mesofilo, a absorção da radiação é mais acentuada nos comprimentos de onda do vermelho; na região do infravermelho próximo, a absorção é extremamente baixa (Taiz et al., 2017).

A figura 13 representa a distribuição do NDVI para a imagem-teste, com base na aplicação do algoritmo apresentado na figura 5. Os valores do NDVI gerado são valores reais contidos entre -1 e 1. Superficialmente, corpos hídricos são representados por valores negativos, enquanto alvos como solo exposto são representados por valores muito próximos de zero. Já para a vegetação, quanto maior o valor do *pixel*, maior será a densidade da vegetação ou sua atividade fotossintética (Verona, 2003; Neto et al., 2008; Krizek e Santos, 2021).

Como resultado do algoritmo apresentado na figura 6, a figura 14 é um mapa da distribuição do SAVI para a imagem-teste utilizada. Assim como para o NDVI, os valores do SAVI são valores reais contidos entre -1 e 1. Todavia, neste último índice tem-se o efeito da interferência do solo minimizado, conforme exposto anteriormente.

A figura 15 é o mapa da distribuição do IAF pela imagem-teste utilizada, a partir do emprego do algoritmo da figura 7. A partir desse índice, pode-se expressar a taxa de crescimento de uma determinada comunidade vegetal. Para a paisagem analisada, o maior valor encontrado de IAF foi de 2,84.

A figura 16 é um exemplo de mapa de emissividade gerado a partir da aplicação do algoritmo contido na figura 8. A emissividade de um determinado objeto representa a relação entre a radiancia real emitida pelo corpo do mundo real e

pelo corpo negro à mesma temperatura. Além disso, a emissividade é função de uma série de fatores, tais como cor, composição química, rugosidade da superfície, umidade e tantos outros (Meneses e Almeida, 2012; Rogic et al., 2021).

A figura 17 é um mapa da distribuição da temperatura de superfície para a imagem-teste utilizada, com base na aplicação do protocolo metodológico aqui descrito. Na paisagem analisada, a menor temperatura de superfície obtida foi de 17,0 °C, enquanto a maior temperatura encontrada apresentou o valor de 38,0 °C. Grande parte da área urbanizada apresentou temperaturas no intervalo de 26 °C a 30 °C. Outra parte da área urbanizada, formada por microrregiões adjacentes às áreas de vegetação, apresentou, preponderantemente, temperaturas um pouco mais baixas, no intervalo de 22 °C a 26 °C. As regiões centrais das áreas vegetadas, mais afastadas do perímetro urbano, entretanto, apresentaram temperaturas ainda mais baixas, na faixa de 17 °C a 22 °C.

A figura 18 corresponde ao gráfico de temperaturas médias de superfície calculadas a partir de vinte pontos amostrais aleatórios obtidos para as classes vegetação arbórea, vegetação rasteira e área urbanizada. As barras de erro se

referem ao desvio-padrão e diferentes letras nas barras indicam médias estatisticamente diferentes (teste de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$). Conforme evidenciado estatisticamente, as três classes apresentaram diferentes temperaturas médias de superfície. As áreas de vegetação arbórea apresentaram temperatura média de superfície menor que a das áreas de vegetação rasteira, as quais, por sua vez, apresentaram temperatura média de superfície menor que a das áreas urbanizadas (Figura 18). Em relação à classe “vegetação arbórea”, a temperatura média de superfície obtida foi de 21,55 °C; para a classe “vegetação rasteira”, a temperatura média foi de 24,65 °C; já para a classe “área urbanizada”, a temperatura média foi de 27,65 °C. A constatação de que a área urbanizada apresenta temperaturas mais elevadas resulta da substituição de superfícies naturais, como vegetação e solo exposto, por materiais, como asfalto e concreto, que reduzem a cobertura vegetal e alteram radicalmente as propriedades de impermeabilidade, radiativas e térmicas da área urbana (Costa et al, 2010; Naim e Al-Kafy, 2021). Esse fato evidencia que a presença da vegetação contribui para a diminuição da temperatura de superfície.

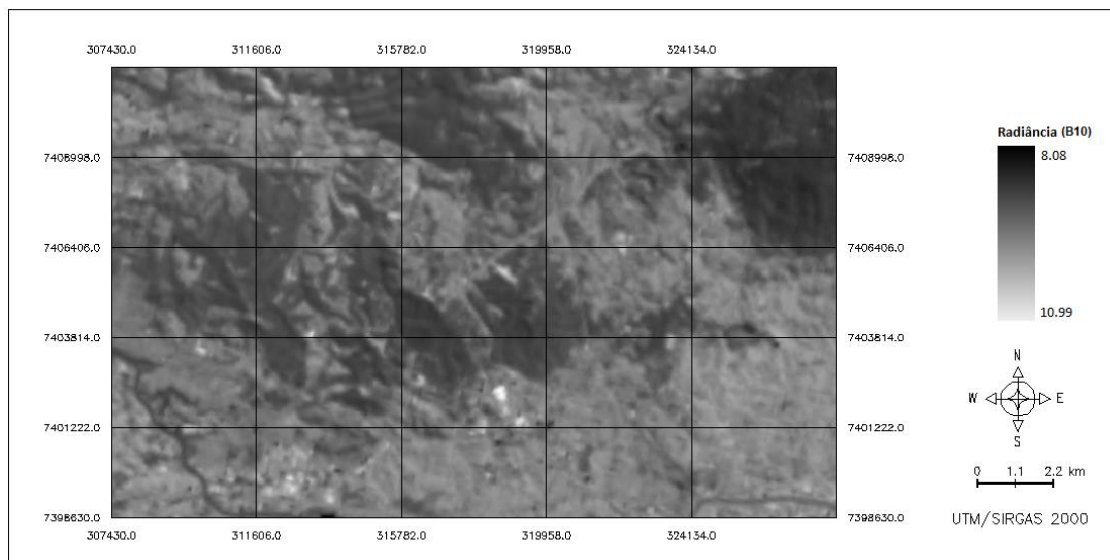


Figura 10. Mapa de distribuição da radiância obtida para a imagem-teste.

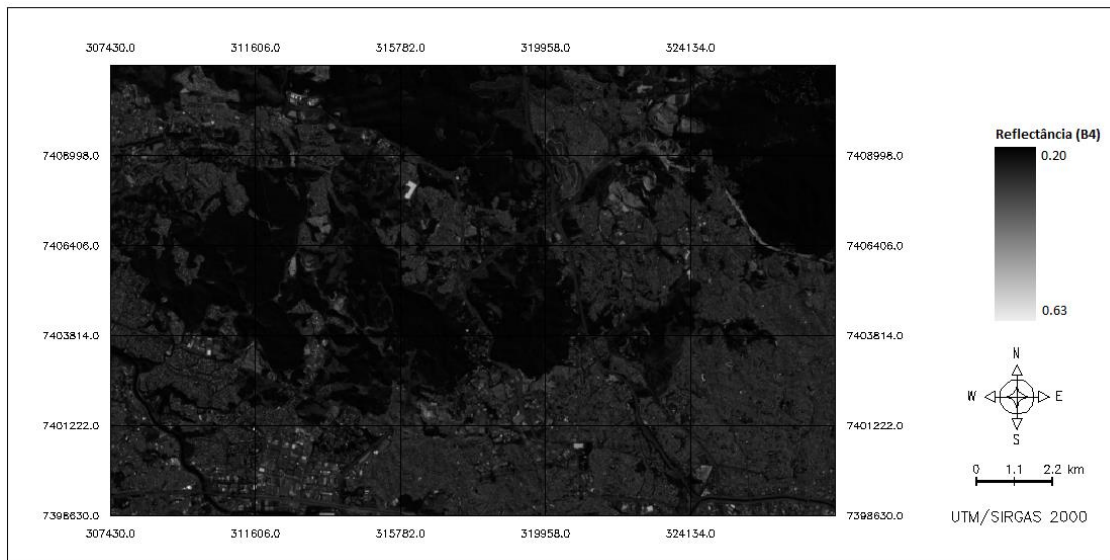


Figura 11. Mapa de distribuição da reflectância (B4) obtida para a imagem-teste.

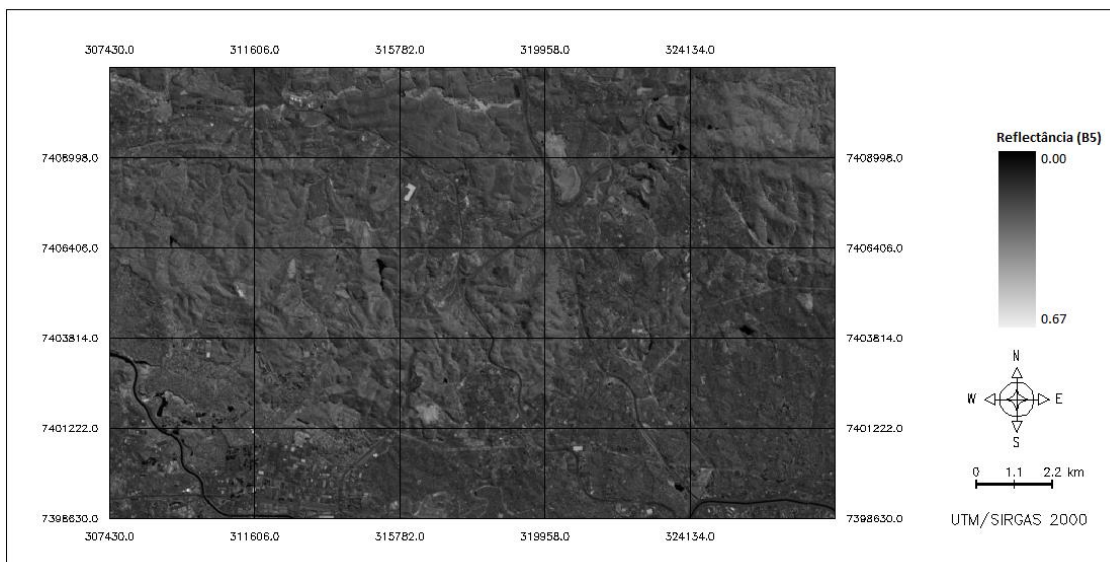


Figura 12. Mapa de distribuição da reflectância (B5) obtida para a imagem-teste.

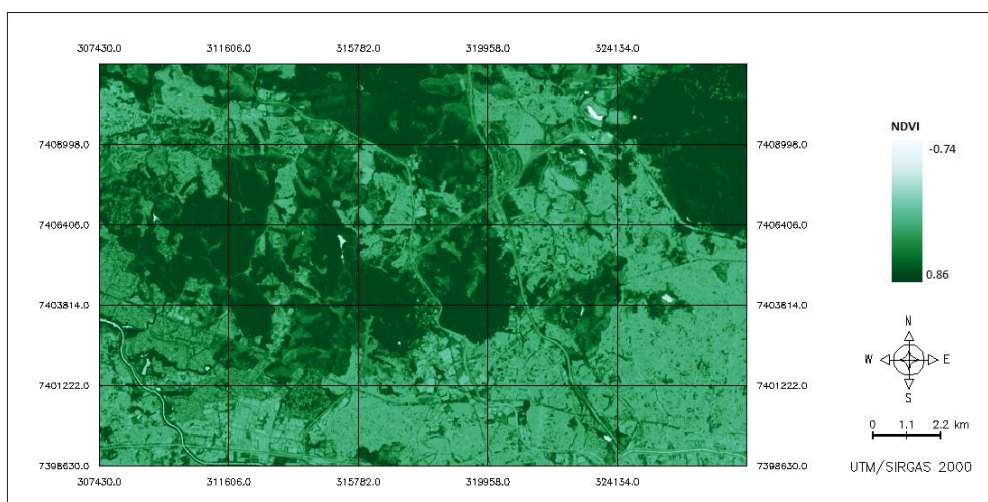


Figura 13. Mapa de distribuição do NDVI obtido para a imagem-teste.

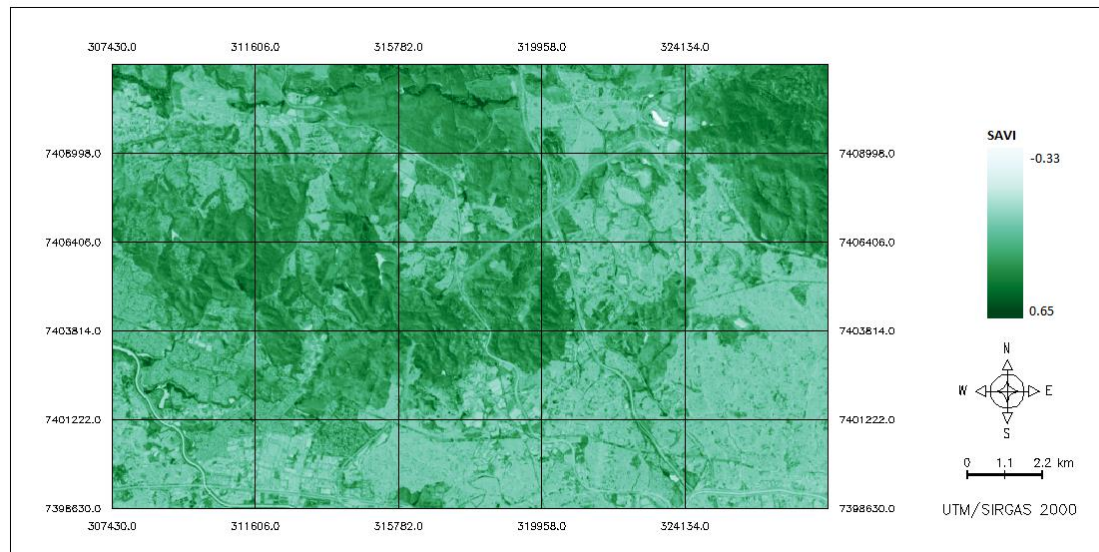


Figura 14. Mapa de distribuição do SAVI obtido para a imagem-teste.

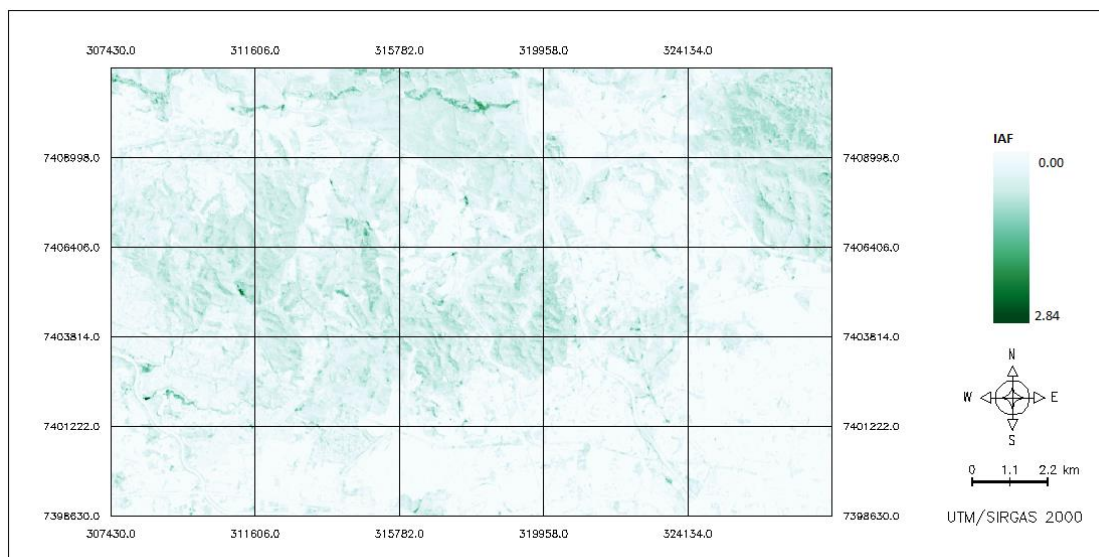


Figura 15. Mapa de distribuição do IAF obtido para a imagem-teste.

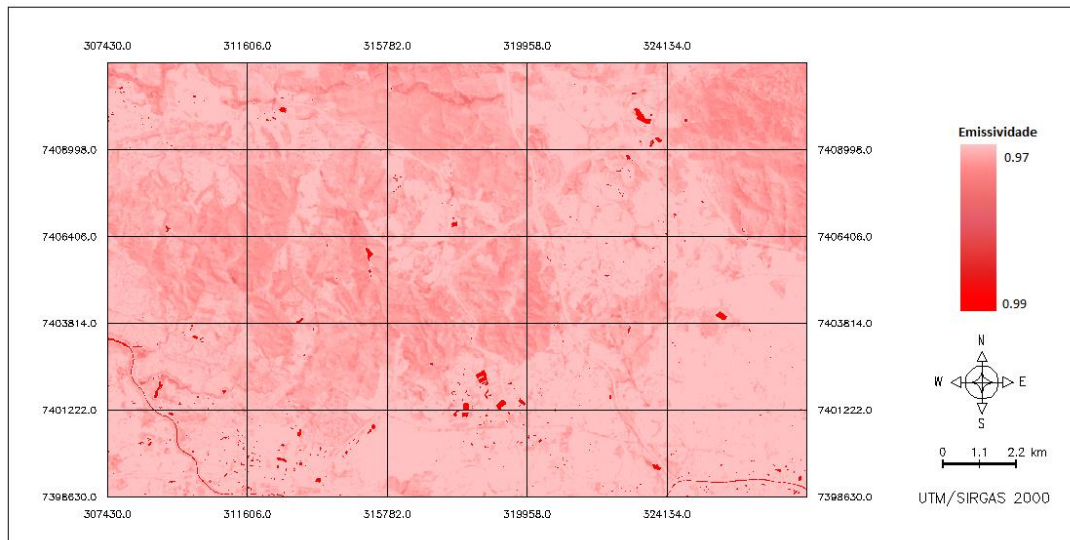


Figura 16. Mapa de distribuição da emissividade obtida para a imagem-teste.

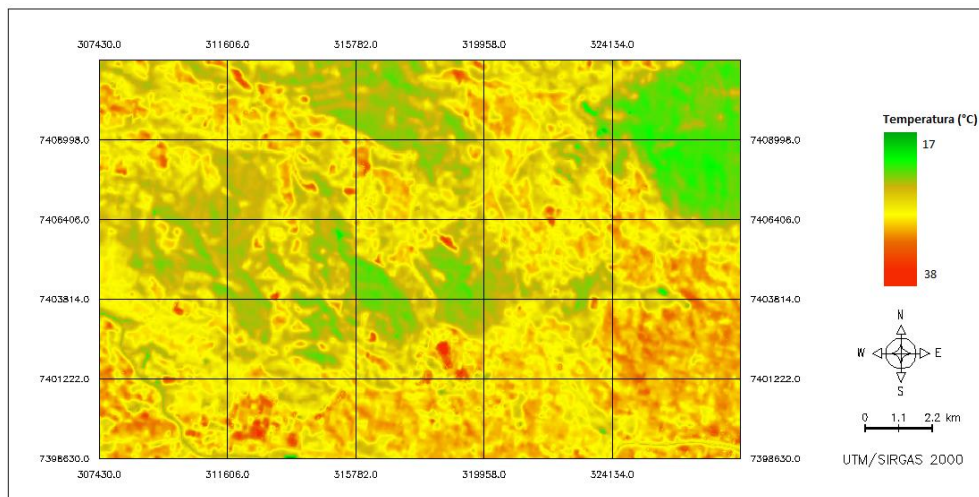


Figura 17. Mapa de distribuição da temperatura de superfície obtida para a imagem-teste.

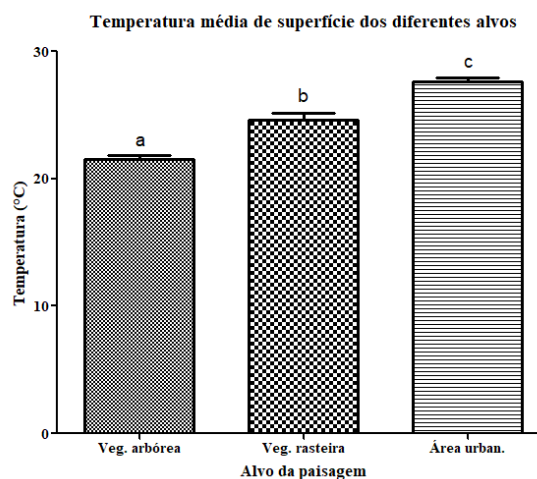


Figura 18. Gráfico das temperaturas médias de superfície dos diferentes alvos da paisagem (vegetação arbórea, vegetação rasteira e área urbanizada), calculadas a partir dos pontos amostrais obtidos. Diferentes letras nas barras indicam médias estatisticamente diferentes (teste de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

Conclusões

O objetivo central desta pesquisa foi desenvolver e analisar um protocolo metodológico composto por algoritmos que calculassem, a partir dos métodos *SEBAL* e *METRIC*, diferentes parâmetros físicos e ecológicos de imagens Landsat 8 em um *software* livre, adotando-se para isso a *LEGAL* do *SPRING*, e chegando-se ao cálculo da temperatura de superfície. Tal protocolo foi planejado e é aqui divulgado de modo a possibilitar a replicação e execução de outras pesquisas que visem à obtenção de dados de temperatura de superfície através do *SPRING*, um *software* gratuito e brasileiro, muito utilizado em estudos de sensoramento remoto e geoprocessamento. Trata-se de um protocolo inédito, que pode constituir base de referência para pesquisadores, estudantes e gestores não familiarizados com o desenvolvimento de algoritmos, mas que visem à obtenção correta e adequada de mapas de SRT. Também fica evidenciado que é extremamente viável a utilização de ambientes livres para trabalhos com álgebras de mapas, ambientes estes que podem demonstrar robustez de processamento igual a versões de *softwares* pagos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pró-reitoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (PRP-IFSP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de Bolsa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) ao primeiro autor.

Referências

- Allen, R.G. et al., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133(4), 380–394. Disponível: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)). Acesso: 03 set. 2022.
- Almeida, C.R. et al., 2021. Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data/Techniques: A Systematic Review. *Environments* 8(10), 105. Disponível: <https://doi.org/10.3390/environments8100105>. Acesso: 03 set. 2022.
- Awais, M. et al., 2022. UAV-based remote sensing in plant stress image using high-resolution thermal sensor for digital agriculture practices: a meta-review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03801-5>. Acesso: 03 set. 2022.
- Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands. Disponível: <https://edepot.wur.nl/206553>. Acesso: 03 set. 2022.
- Bastiaanssen, W.G.M. et al., 1998a. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212, 198–212. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4). Acesso: 03 set. 2022.
- Bastiaanssen, W.G.M. et al., 1998b. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology* 212, 213–229. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6). Acesso: 03 set. 2022.
- Berger, R. et al., 2019. Índices de vegetação para a estimativa do índice de área foliar em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. *Ciência Florestal* 29(2), 885–899. Disponível: <https://doi.org/10.5902/1980509816942>. Acesso: 03 set. 2022.
- Câmara, G., 1995. Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos. Tese (Doutorado). São José dos Campos, INPE.
- Carnahan, W.H.; Larson, R.C., 1990. An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment* 33, 65–71. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90056-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90056-R). Acesso: 03 set. 2022.
- Chander, G.; Markham, B. L., 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 2674–2677. Disponível: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464>. Acesso: 03 set. 2022.
- Costa, D.F. et al., 2010. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP através da utilização de geotecnologias. *Engenharia Agrícola* 30(5), 974–985. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000500019>. Acesso: 03 set. 2022.
- Gates, D.M. et al., 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4(1), 11–20. Disponível: <https://doi.org/10.1364/AO.4.000011>. Acesso: 03 set. 2022.

- Halder, B. et al., 2021. Monitoring the effect of urban development on urban heat island based on remote sensing and geo-spatial approach in Kolkata and adjacent areas, India. *Sustainable Cities and Society* 74, 103186. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103186>. Acesso: 03 set. 2022.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (Savi). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). Acesso: 03 set. 2022.
- Huete, A.R. et al., 1985. Spectral response of plant canopies with different soil background. *Remote Sensing of Environment* 17, 37–53. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7). Acesso: 03 set. 2022.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. O que é o LEGAL? Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/spring/english/tutorial/legal.html>. Acesso: 03 set. 2022.
- Krizek, J.P.O.; Santos, L.C.M., 2021. Protocolo metodológico para obtenção dos valores de reflectância e de NDVI de imagens Landsat 8/OLI utilizando LEGAL. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14(2), 869–880. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p869-880>. Acesso: 03 set. 2022.
- Lin, L. et al., 2021. UAV Based Estimation of Forest Leaf Area Index (LAI) through Oblique Photogrammetry. *Remote Sensing* 13(4), 803. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs13040803>. Acesso: 03 set. 2022.
- McCarthy, E.D. et al., 2021. Drone-based thermal remote sensing provides an effective new tool for monitoring the abundance of roosting fruit bats. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 7, 461–474. Disponível: <https://doi.org/10.1002/rse2.202>. Acesso: 03 set. 2022.
- Meneses, P.R.; Almeida, T., 2012. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: Universidade de Brasília.
- Naim, N.H.; Al-Kafy, A., 2021. Assessment of urban thermal field variance index and defining the relationship between land cover and surface temperature in Chattogram city: A remote sensing and statistical approach. *Environmental Challenges* 4, 100107. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100107>. Acesso: 04 set. 2022.
- Neinavaz, E. et al., 2021. Thermal infrared remote sensing of vegetation: Current status and perspectives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 102, 102415. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102415>. Acesso: 03 set. 2022.
- Neto, R. T. B. et al., 2008. Determinação de valores físicos de imagens TM/Landsat-5 utilizando a linguagem LEGAL para obter índices de vegetação. *Anais do II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife, 2008.
- Nichol, J.E., 1996. High-Resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology* 35, 135–146. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035%3C0135:HRSTPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035%3C0135:HRSTPR%3E2.0.CO;2). Acesso: 03 set. 2022.
- Rogic, N. et al., 2021. The Impact of Dynamic Emissivity–Temperature Trends on Spaceborne Data: Applications to the 2001 Mount Etna Eruption. *Remote Sensing* 14(7), 1641. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs14071641>. Acesso: 04 set. 2022.
- Rouse, J. W. et al., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Proceedings of the Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* 3, Washington 1, 309–317. Disponível: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso: 03 set. 2022.
- Taiz, L. et al., 2017. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed.
- Tepanosyan, G. et al., 2021. Studying spatial-temporal changes and relationship of land cover and surface Urban Heat Island derived through remote sensing in Yerevan, Armenia. *Building and Environment* 187, 107390. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107390>. Acesso: 03 set. 2022.
- Richter, R. et al., 2021. Detecting Tree Species Effects on Forest Canopy Temperatures with Thermal Remote Sensing: The Role of Spatial Resolution. *Remote Sensing* 13(1), 135. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs13010135>. Acesso: 03 set. 2022.
- USGS. United States Geological Survey, 2019. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls: EROS. Disponível: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>. Acesso: 03 set. 2022.
- Verona, J. D., 2003. Classificação e Monitoramento Fenológico Foliar da Cobertura

- Vegetal na Região da Floresta Nacional do Tapajós – Pará, Utilizando Dados Multitemporais do Sensor Thematic Mapper (TM) do Landsat. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Waters, R. et al., 2002. SEBAL – Surface Energy Balance Algorithms for Land: Advanced Training and User’s Manual. British Columbia: Waters Consulting. Disponível: <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso: 03 set. 2022.
- Weng, Q. et al., 2004. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 66, 467–483. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>. Acesso: 03 set. 2022.
- Weng, Q.; Quattrochi, D.A., 2006. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue. *Remote Sensing of Environment* 104, 119–122. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.002>. Acesso: 03 set. 2022.
- Xian, G. et al., 2022. Monitoring and characterizing multi-decadal variations of urban thermal condition using time-series thermal remote sensing and dynamic land cover data. *Remote Sensing of Environment* 269, 112803. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112803>. Acesso: 03 set. 2022.
- Zeng, Y. et al., 2022. Combining near-infrared radiance of vegetation and fluorescence spectroscopy to detect effects of abiotic changes and stresses. *Remote Sensing of Environment* 270, 112856. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112856>. Acesso: 04 set. 2022.
- Zhang, X. et al., 2021. A practical reanalysis data and thermal infrared remote sensing data merging (RTM) method for reconstruction of a 1-km all-weather land surface temperature. *Remote Sensing of Environment* 260, 112437. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112437>. Acesso: 03 set. 2022.