



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Identificação de Ilhas de Calor Urbanas por meio dos Sensores Orbitais MODIS e OLI/TIRS.

Autor: Rafael da Silva Rodrigues
Orientador: Ph.D Giancarlo Santilli
Coorientador: Ph.D Paolo Gessini

Brasília, DF
2020



Rafael da Silva Rodrigues

Identificação de Ilhas de Calor Urbanas por meio dos Sensores Orbitais MODIS e OLI/TIRS.

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Ph.D Giancarlo Santilli

Coorientador: Ph.D Paolo Gessini

Brasília, DF

2020

Rafael da Silva Rodrigues

Identificação de Ilhas de Calor Urbanas por meio dos Sensores Orbitais MODIS e OLI/TIRS. / Rafael da Silva Rodrigues. – Brasília, DF, 2020-
64 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Ph.D Giancarlo Santilli

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2020.

1. Observação da Terra. 2. Ilhas de Calor Urbano. I. Ph.D Giancarlo Santilli.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Identificação de Ilhas
de Calor Urbanas por meio dos Sensores Orbitais MODIS e OLI/TIRS.

CDU 02:141:005.6

Rafael da Silva Rodrigues

Identificação de Ilhas de Calor Urbanas por meio dos Sensores Orbitais MODIS e OLI/TIRS.

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 17 de dezembro de 2020:

Ph.D Giancarlo Santilli
Orientador

Ph.D Paolo Gessini
Convidado 1

Ph.D Domenico Simone
Convidado 2

Brasília, DF
2020

*“O problema crucial não é criar novos empregos. É criar novos empregos nos quais o desempenho dos humanos seja melhor que o dos algoritmos.
(Yuval Noah Harari)*

Resumo

Uma Ilha de Calor Urbano (ICU) é resultado da elevação das temperaturas urbanas em comparação com áreas rurais circundantes. Os primeiros estudos de temperaturas urbanas que permitiram identificar as ICUs tiveram início em 1818 por Luke Howard. Atualmente, as análises de temperaturas urbanas podem ser realizadas por sensores orbitais, tais como OLI/TIRS e MODIS, que geram produtos que guardam informações sobre a radiação emitida pela superfície terrestre. Neste trabalho, utilizou-se produtos OLI/TIRS e MODIS para estimar a Temperatura Superficial Terrestre (LST) de alguns locais de interesse localizados em Brasília (Distrito Federal). Esses dados foram comparados com as medições de temperatura realizadas in situ para a validação desses dados. As comparações indicam que as estimativas de LST podem ser utilizadas para a identificação de ICUs levando em consideração um erro de $\pm 1,42^{\circ}\text{C}$.

Palavras-chaves: Temperatura Superficial Terrestre (LST). Ilhas de Calor Urbano. Sensores Orbitais.

Abstract

An Urban Heat Island (UHI) is the result of the elevation of the temperature in urban areas comparing to its surrounding rural areas. The first studies of urban temperatures that allowed the identification of UHI were set about in 1818 by Luke Howard. Nowadays, the analysis of urban temperatures can be performed by using orbital sensors such as OLI/TIRS and MODIS, which generate products with information about the radiation emitted by the terrestrial surface. In this study, OLI/TIRS and MODIS products were used to estimate the Land Surface Temperature (LST) of certain locations in Brasília. These estimated LST were compared to in situ measures of temperature to validate the LST data. These comparisons indicate that the estimation of LST can be used to identify UHI, taking into account an error of $\pm 1,42^{\circ}\text{C}$.

Key-words: Land Surface Temperature (LST). Urban Heat Island. Orbital Sensors.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Variação da radiância do corpo negro em função do comprimento de onda para várias temperaturas. Fonte: < http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2016/11/Aula-21-Radiaç~ao-Térmica-Introduç~ao.pdf >, Adaptado	19
Figura 2 – Irradiância incidida sobre um material semitransparente gera as partes Refletida G_{ref} , Absorvida G_{abs} e Transmitida G_{tr} . Fonte: (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998), adaptado.	21
Figura 3 – Transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda da radiação emitida. Fonte: Wikipedia. Disponível em: < https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window >. Acesso em 3 de dezembro de 2020.	22
Figura 4 – Imagens adquiridas com (a) MODIS com 1 km de resolução espacial e (b) TIRS com 100 m de resolução espacial.	24
Figura 5 – Imagens adquiridas com sensores de diferentes resoluções radiométricas. Fonte: (MENESES; ALMEIDA, 2012).	24
Figura 6 – Locais de interesse para comparação e validação dos dados.	27
Figura 7 – Fluxograma da estimativa da LST para OLI/TIRS e MODIS.	28
Figura 8 – Imagem do dia 2 de setembro de 2020 gerada a partir dos dados da banda 10 do sensor OLI/TIRS	30
Figura 9 – Imagem do dia 2 de setembro de 2020, as 13h35min, gerada a partir dos dados da banda 31 do sensor MODIS/Terra.	33
Figura 10 – LST MODIS/Terra nos locais de interesse (a) n°1, (b) n°2, (c) n°3, (d) n°4 e (e) n°5 — Verão.	36
Figura 11 – LST MODIS/Terra, MODIS/Aqua e OLI/TIRS nos locais de interesse (a) n°1, (b) n°2, (c) n°3, (d) n°4, e (e) n°5 — Outono.	37
Figura 12 – LST MODIS/Terra e OLI/TIRS nos locais de interesse (a) n°2, (b) n°3, (c) n°4 e (d) n°5 — Inverno.	38
Figura 13 – LST MODIS/Terra, MODIS/Aqua e OLI/TIRS nos locais de interesse (a) n°1, (b) n°2, (c) n°3, (d) n°4 e (d) n°5 — Primavera.	39
Figura 14 – LST médias estimadas para cada estação para os sensores (a) OLI/-TIRS e (b) MODIS/Terra.	40
Figura 15 – LST — MODIS/Terra; 29/12/2019.	52
Figura 16 – LST — MODIS/Terra; 14/01/2020.	53
Figura 17 – LST — MODIS/Terra; 28/04/2020.	53
Figura 18 – LST — MODIS/Terra; 28/05/2020.	54
Figura 19 – LST — MODIS/Terra; 13/06/2020.	54
Figura 20 – LST — MODIS/Terra; 15/07/2020.	55

Figura 21 – LST — MODIS/Terra; 16/08/2020.	55
Figura 22 – LST — MODIS/Terra; 26/09/2020.	56
Figura 23 – LST — MODIS/Terra; 03/10/2020.	56
Figura 24 – LST — MODIS/Aqua; 29/05/2020.	57
Figura 25 – LST — MODIS/Aqua; 14/06/2020.	57
Figura 26 – LST — MODIS/Aqua; 16/07/2020.	58
Figura 27 – LST — MODIS/Aqua; 04/10/2020.	58
Figura 28 – LST — OLI/TIRS; 27/04/2020.	59
Figura 29 – LST — OLI/TIRS; 29/05/2020.	59
Figura 30 – LST — OLI/TIRS; 14/06/2020.	60
Figura 31 – LST — OLI/TIRS; 16/07/2020.	60
Figura 32 – LST — OLI/TIRS; 17/08/2020.	61
Figura 33 – LST — OLI/TIRS; 02/09/2020.	61
Figura 34 – LST — OLI/TIRS; 04/10/2020.	62
Figura 35 – LST — OLI/TIRS; 21/11/2020.	62

Lista de tabelas

Tabela 1 – As diferentes faixas espectrais do sensor orbital TM e suas aplicações principais. Fonte: (CÂMARA et al., 1996)	23
Tabela 2 – As diferentes faixas espectrais do sensor orbital MODIS e suas aplicações principais. Fonte: < https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php >	25
Tabela 3 – As diferentes faixas espectrais dos sensores OLI e TIRS, e suas aplicações principais. Fonte: < https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-oli-and-tirs-an >	
Tabela 4 – Agrupamentos em bandas espectrais do produto Level 1B. Nota: <i>RefSB</i> significa Banda Solar Reflexiva, e <i>Emissive</i> significa Banda Emissiva Termal. Fonte: (TOLLER et al., 2003).	33
Tabela 5 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Verão.	36
Tabela 6 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Outono.	37
Tabela 7 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Inverno.	38
Tabela 8 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Primavera.	39
Tabela 9 – Diferenças entre as médias de LST dos locais de interesse n° 4 e n° 3 (Ceilândia/Taguatinga, e Asa Sul e Asa Norte, respectivamente). . . .	40

Lista de abreviaturas e siglas

BT	Temperatura de Brilho
DAAC	Distributed Active Archive Center
DN	Números Digitais
ICU	Ilha de Calor Urbano
LAADS	Level-1 and At-mosphere Archive Distribution System
LSE	Emissividade Superficial Terrestre
LST	Temperatura Superficial Terrestre
L1TP	<i>Landsat Level-1 Precision Terrain</i>
MODIS	<i>Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer</i>
MSCT	<i>MODIS Characterization and Support Team</i>
NC	Níveis de Cinza
NDVI	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
NIR	Infra-Vermelho Próximo
NTM	<i>NDVI Threshold Method</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
SWIR	Infra-Vermelho de Ondas Curtas
TIR	Infra-Vermelho Termal
TIRS	<i>Thermal Infra-Red Sensor</i>
VIS	Sistema de Imageamento Visível

Lista de símbolos

$E_{b\lambda}$	Radiância espectral do corpo negro
λ	Comprimento de onda
T	Temperatura absoluta
k	Constante de Boltzmann
h	Constante de Planck
c_0	Velocidade da luz
E_λ	Radiância espectral do corpo real
E_b	Radiância total do corpo negro
ε_λ	Emissividade espectral
λ_{max}	Comprimento de onda na temperatura máxima
BT	Temperatura de brilho
$I_{\lambda,e}$	Intensidade de radiação espectral emitida por um corpo real
$I_{b\lambda}$	Intensidade de radiação espectral emitida por um corpo negro
α	Absortividade
ρ	Reflexividade
τ	Transmissividade
G_{abs}	Irradiância absorvida
G_{ref}	Irradiância refletida
G_{tr}	Irradiância transmitida
G	Irradiância
$NDVI$	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
ρ_{nir}	Reflectância no espectro NIR
ρ_{red}	Reflectância no espectro vermelho

ε_S	Emissividade do solo
ε_V	Emissividade da vegetação
P_V	Proporção de vegetação
$d\varepsilon$	Constante de rugosidade do solo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
	Introdução	15
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
	Revisão Bibliográfica	17
2.1	Propriedades Radioativas	17
2.1.1	Lei de Planck	17
2.1.2	Emissividade	20
2.1.3	Absortividade, Reflexividade e Transmissividade	20
2.2	Observação da Terra	22
2.2.1	Janelas atmosféricas	22
2.3	Resolução	23
2.4	Sensores MODIS e OLI/TIRS	25
2.4.1	MODIS	25
2.4.2	OLI/TIRS	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	Estimativa de LST utilizando dados OLI/TIRS	29
3.1.1	Download de produtos OLI/TIR	29
3.1.2	O Produto <i>Landsat Level-1 Precision Terrain (L1TP)</i>	29
3.1.3	Aquisição dos dados de radiância	30
3.1.4	Cálculo da Temperatura de Brilho	30
3.1.5	Método NTM (<i>NDVI Threshold Method</i>) para estimar a Emissividade da Superfície Terrestre (LSE)	31
3.2	Estimativa de LST utilizando dados MODIS	32
3.2.1	Download de produtos MODIS	32
3.2.2	O Produto MODIS Level 1B	32
3.2.3	Aquisição dos dados de radiância	33
3.2.4	Cálculo da Temperatura de Brilho	33
4	RESULTADOS	35
4.1	Verão — 21 de dezembro de 2019 a 19 de março de 2020	36

4.2	Outono — 20 de março a 19 de junho de 2020	37
4.3	Inverno — 20 de junho a 21 de setembro de 2020	38
4.4	Primavera — 22 de setembro a 21 de novembro de 2020	39
4.5	Comparação entre os locais de interesse	40
4.6	Discussão	41
4.7	Conclusão	41

APÊNDICES 42

APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO PARA O CÁLCULO DO LST UTILIZANDO DADOS MODIS	43
---	-----------

APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO PARA O CÁLCULO DO LST UTILIZANDO DADOS OLI/TIRS	47
--	-----------

APÊNDICE C – IMAGENS GERADAS A PARTIR DOS VALORES DE LST CALCULADOS	52
--	-----------

REFERÊNCIAS	63
------------------------------	-----------

1 Introdução

Uma Ilha de Calor Urbano (ICU) é resultado da elevação das temperaturas nas zonas urbanas e metropolitanas em comparação com áreas rurais circundantes. Uma ICU se forma mais comumente em áreas urbanas/suburbanas pois os materiais utilizados para a construção dessas áreas absorvem e armazenam a radiação emitida pelo sol por mais tempo. Superfícies secas e escuras, como asfalto, podem chegar a 88 °C durante o dia, enquanto que superfícies com vegetação e solo úmido, nas mesmas condições, chegam a atingir apenas 18 °C (GARTLAND, 2011).

Apesar de os primeiros estudos sobre ICUs terem sido realizados em 1818 por Luke Howard, a análise das temperaturas urbanas utilizando sensoriamento remoto teve início recente, na década de 1980, viabilizado pelos satélites Landsat. Estes satélites são dotado de bandas termais capazes de captar a radiação emitida pela superfície terrestre, o que possibilitou diversos avanços no estudo das temperaturas urbanas (VIANNA, 2018).

Os dados gerados a partir do sensoriamento remoto são ferramentas poderosas para o estudo de ambientes urbanos. Esses dados podem providenciar informação sobre uma grande área, como a de uma cidade, de uma só vez. Isso é uma vantagem sobre dados gerados em estações meteorológicas, que na maioria das vezes não cobrem a área desejada/necessária para realizar um estudo mais completo, o que pode deixar grandes áreas dentro de cidades sem informações. Por esses e outros motivos, estudos de viabilidade da utilização de sensores orbitais para identificação de ICUs são cada vez mais realizados.

Há diversos sensores orbitais que possibilitam o estudo de ICUs, como, por exemplo, os sensores OLI/TIRS (a bordo do satélite Landsat 8), que podem gerar imagens detalhadas das superfície terrestre por terem boa resolução espacial; ou, ainda, os sensores MODIS (a bordo dos satélites Terra e Aqua), que podem gerar dados sobre toda a superfície terrestre diariamente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade da utilização de imagens geradas pelos sensores MODIS e OLI/TIRS para a identificação de Ilhas de Calor Urbano (ICU) em Brasília (Distrito Federal).

1.1.2 Objetivos específicos

Para verificar a viabilidade desse método para a identificação das ICUs, os objetivos específicos são:

- Calcular a Temperatura da Superfície Terrestre (do inglês *Land Surface Temperature* — LST) utilizando os dados adquiridos pelos sensores MODIS e OLI/TIRS;
- Comparar as LST obtidas nos cálculos para validação desses dados;
- Comparar as LST obtidas com as medições feitas in situ para validação dos dados.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentadas alguns conceitos importantes para o desenvolvimento do trabalho. Serão explicadas as leis físicas que governam a emissão de radiação: a lei de Planck, lei de Wien, lei de Stefan-Boltzman. Além disso, serão explicados conceitos de sensoriamento remoto.

2.1 Propriedades Radioativas

Para alguns materiais, como a água e o vidro, que são considerados semitransparentes, a radiação não é considerada como um fenômeno de superfície, visto que a radiação visível pode penetrar espessuras consideráveis. Para outros materiais utilizados no dia a dia, como metais, tijolos e madeiras, a radiação é considerada um fenômeno de superfície. Estes materiais são opacos para radiação térmica, pois a radiação do interior desses materiais nunca alcança sua superfície, e a radiação incidida sobre sua superfície é absorvida em poucos microns da superfície. Para ambos os grupos de materiais, as definições de emissividade, absorvidade, reflectividade e transmissividade são importantes (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998).

Para as definições nesse capítulo, define-se o corpo negro como emissor e absorvedor perfeito. Assim sendo, nenhum outro corpo pode emitir mais radiação que um corpo negro na mesma temperatura. Além disso, o corpo negro absorve toda radiação incidida sobre ele e emite radiação em todas as direções uniformemente (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998).

2.1.1 Lei de Planck

Em casos práticos, é interessante saber a radiância espectral do corpo negro. A relação para essa radiância foi desenvolvida por Max Planck, em 1901, em conjunto com sua famosa teoria quântica. Essa relação é conhecida como a Lei de Planck, e é expressa como:

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad [W/m^2 \cdot \mu m] \quad (2.1)$$

onde

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu m^4/m^2$$

$$C_2 = hc_0/k = 1,439 \times 10^4 \mu m \cdot K$$

ainda, T é a temperatura absoluta da superfície, λ é o comprimento de onda da radiação emitida e $k = 1,38065 \times 10^{-23} J/K$ é a constante de Boltzmann; $h = 6,626 \times 10^{-34}$ é a constante de Planck, $c_0 = 2,99792458 \times 10^8$ é a velocidade da luz (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998).

A radiância total do corpo negro, que é a soma da potência emitida em todos os comprimentos de onda, pode ser calculada com a lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad [W/m^2] \quad (2.2)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura absoluta do corpo em K . Se o corpo observado não é um corpo negro — ou seja, um corpo real — a radiância espectral é menor que a predita pela lei de Planck e pode ser calculada levando em conta a emissividade do corpo, de acordo com a Equação 2.3:

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} \quad [W/m^2 \cdot \mu m] \quad (2.3)$$

onde ε_λ é a emissividade do corpo real. A emissividade é uma função do comprimento de onda do corpo, e seu valor pode variar de zero a um, $0 \leq \varepsilon_\lambda \leq 1$.

A Figura 1 mostra o gráfico da radiância do corpo negro em função do comprimento de onda para várias temperaturas. Neste gráfico, pode-se observar que a radiação emitida por um corpo em qualquer comprimento de onda é proporcional a sua temperatura. Um outro ponto a ser observado é que, a medida que a temperatura aumenta, o gráfico se desloca para a esquerda. Isso significa que mais radiação é emitida em menores comprimentos de onda em maiores temperaturas (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998).

O comprimento de onda em cuja temperatura atinge o valor máximo está relacionado a temperatura pela lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{max} T = 2898 \mu m K \quad (2.4)$$

Considerando o sol como um corpo negro, por exemplo, observando a Figura 1 e utilizando a lei de Wien (Equação 2.4), pode-se analisar o gráfico de radiância do sol, cuja temperatura de superfície é de aproximadamente $5800 K$: o pico da curva a $5800 K$ está localizada no espectro visível ($\lambda = 0,5 \mu m$). A mesma análise pode ser feita para a Terra, cuja temperatura é de aproximadamente $300 K$, e o pico de radiância se encontra no espectro infravermelho termal ($\lambda = 9,66 \mu m$).

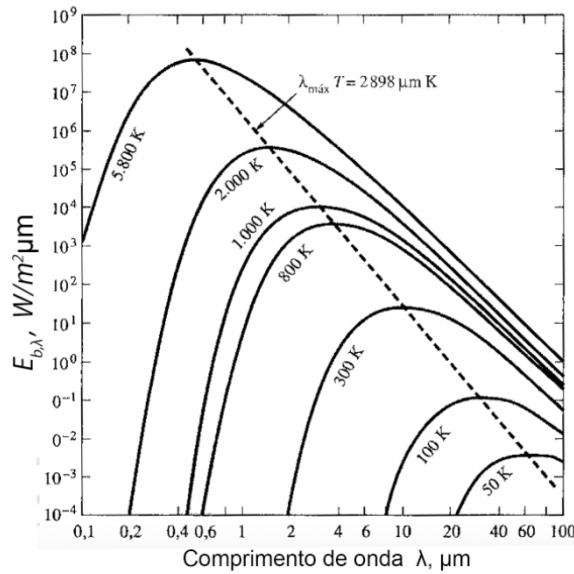


Figura 1 – Variação da radiância do corpo negro em função do comprimento de onda para várias temperaturas. Fonte: <<http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2016/11/Aula-21-Radiaç~ao-Térmica-Introduç~ao.pdf>>, Adaptado

Quando a temperatura de um corpo não é conhecida, a lei de Planck pode ser invertida para calcular a Temperatura de Brilho (BT). Para tal, deve ser possível a aquisição de valores de radiância deste corpo. Utilizando a Equação 2.1, substituindo os valores de C_1 e C_2 e invertendo a equação para calcular a BT de um corpo negro, tem-se (SMITH, 2005):

$$BT = \left(\frac{hc_0}{k\lambda} \right) \left(\frac{1}{\ln(2\pi hc_0^2 \lambda^{-5} / E_{b\lambda}) + 1} \right) \quad [K] \quad (2.5)$$

para uma leitura mais sistemática, faz-se a substituição $K_1 = 2\pi hc_0^2 \lambda^{-5}$ e $K_2 = hc_0/k\lambda$. Então:

$$BT = \frac{K_2}{\ln(K_1/E_{b\lambda} + 1)} \quad [K] \quad (2.6)$$

Para um corpo real, o valor de emissividade deve ser considerado para o cálculo da temperatura desse corpo. Equação 2.7 é a lei de Planck invertida considerando o valor de emissividade:

$$BT = \frac{K_2}{\ln(\varepsilon_\lambda K_1/E_{b\lambda} + 1)} \quad [K] \quad (2.7)$$

Em alguns casos obter a emissividade real do corpo é um desafio, pois podem haver interferências. Um desses casos é a aquisição de dados de radiação térmica emitida pela superfície da Terra utilizando sensores orbitais, pois essa radiação é levemente modificada pela atmosfera ao atravessá-la. A emissividade pode ser considerada como um

fator de proporcionalidade que escala a radiância do corpo negro para medir a radiância emitida por um corpo e sua habilidade de transmitir radiação pela atmosfera (REDDY; MANIKIAM, 2017).

A Temperatura de Brilho (BT) é uma estimativa da Temperatura Superficial Terrestre (LST), que é a temperatura da superfície que pode ser medida quando em contato direto com o instrumento de medição. Naturalmente, ao considerar o efeito da emissividade para o cálculo da BT, a estimativa de LST é mais precisa.

2.1.2 Emissividade

Emissividade é definida como a razão entre a radiação emitida por um corpo e a radiação emitida por um corpo negro. A emissividade é um valor adimensional que indica a capacidade de um corpo de emitir radiação. De acordo com Cengel, Klein e Beckman (1998), a emissividade de uma superfície real pode ser calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b\lambda}(\lambda, T)} \quad (2.8)$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação emitida e θ diz respeito a quantidade direcional. Nota-se que a intensidade de radiação do corpo negro ($I_{b\lambda}$) é independente da direção (θ e ϕ). Geralmente se trabalha com a média do valor de emissividade em todas as direções, a emissividade hemisférica espectral, que pode ser expressa como:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{b\lambda}(\lambda, T)} \quad (2.9)$$

onde $E_{\lambda}(\lambda, T)$ [$W/m^2 \cdot \mu m$] é a radiância espectral de um corpo real e $E_{b\lambda}(\lambda, T)$ é a radiância espectral do corpo negro. Nota-se que estes valores são uma função do comprimento de onda da radiação emitida e da temperatura absoluta do corpo.

2.1.3 Absortividade, Reflexividade e Transmissividade

Quando a radiação emitida por um corpo alcança uma superfície, parte dessa radiação é absorvida, parte é refletida, e parte é transmitida. Essas partes são chamadas de absortividade α , reflexividade ρ e transmissividade τ . (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998). Estes valores podem ser escritos em função da radiação incidida sobre a superfície (irradiação, denotada por G):

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (2.10)$$

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.11)$$

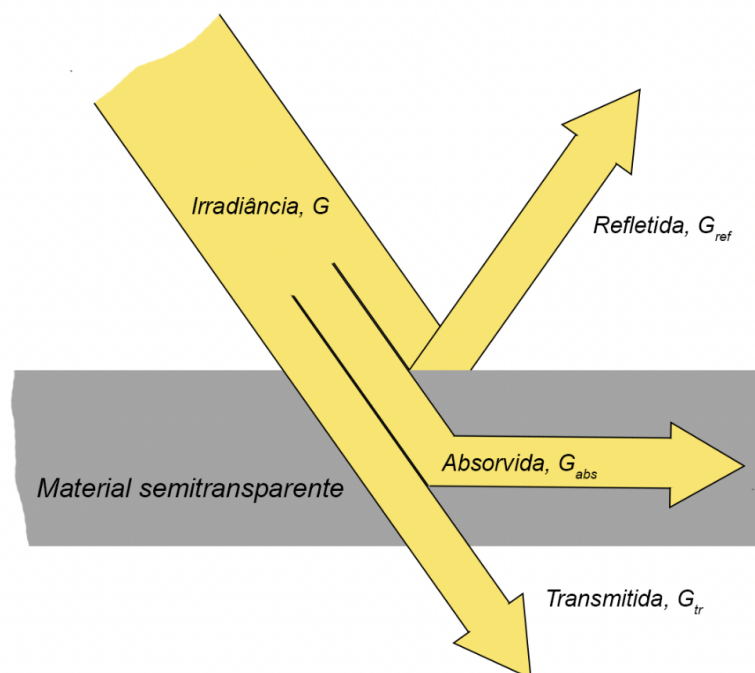


Figura 2 – Irradiância incidida sobre um material semitransparente gera as partes Refletida G_{ref} , Absorvida G_{abs} e Transmitida G_{tr} . Fonte: (CENGEL; KLEIN; BECKMAN, 1998), adaptado.

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (2.12)$$

onde G_{abs} , G_{ref} e G_{tr} são as frações de irradiação absorvida, refletida e transmitida, respectivamente, tal que $G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G$ [W/m^2] e $\alpha + \rho + \tau = 1$.

2.2 Observação da Terra

A utilização de sensores orbitais para a aquisição de dados de radiação térmica faz parte da ciência chamada sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto é a ciência de adquirir, processar e analisar dados com o objetivo de obter informações sobre um lugar, área ou fenômeno utilizando equipamentos que não entram em contato com o objeto sob estudo (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). Observação da Terra é o sensoriamento remoto cujo objeto sob investigação é a Terra.

Nesta seção, serão explicados conceitos de Observação da Terra importantes para a compreensão do funcionamento da aquisição de dados por sensores orbitais; e como podem ser usados esses dados.

2.2.1 Janelas atmosféricas

As alterações que a atmosfera causa são um fator importante para a aquisição de dados da superfície terrestre com sensores orbitais. A aquisição desses dados é feita utilizando técnicas de Observação da Terra. O resultado do processo de Observação da Terra é geralmente guardado em imagens, que são geradas por sensores orbitais que podem captar a radiação emitida pelo sol e refletida pela superfície da Terra; ou a radiação emitida pela própria superfície da Terra.

A radiação térmica emitida pela superfície da Terra passa por toda a atmosfera, o que gera pequenas alterações na radiação antes de chegar aos sensores orbitais. O perfil de transmitância da atmosfera terrestre (Figura 3) mostra que há bandas em que a transmitância é alta. Estas faixas espectrais são chamadas de janelas atmosféricas, pois nesses comprimentos de onda, a atmosfera é semitransparente (SMITH, 2005).

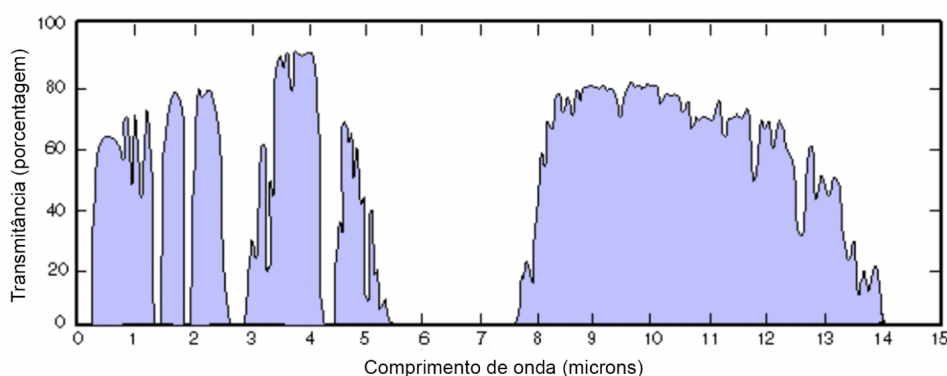


Figura 3 – Transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda da radiação emitida. Fonte: Wikipedia. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window>. Acesso em 3 de dezembro de 2020.

Há diversos tipos de sensores que trabalham em diversas bandas para diferentes aplicações, como por exemplo o sensor TM (*Thematic Mapper*) — que operou nos satélites

Landsat 4 e 5 — mostrado na Tabela 1 juntamente com as aplicações principais de cada uma de suas bandas.

Banda	Faixa Espectral (μm)	Principais aplicações
1	0.45 - 0.52	Mapeamento de águas costeiras Diferenciação entre solo e vegetação Diferenciação entre vegetação coníferas e decídua
2	0.52 - 0.60	Reflectância de vegetação verde sadia
3	0.63 - 0.69	Absorção de clorofila Diferenciação de espécies vegetais
4	0.76 - 0.90	Levantamento de biomassa Delineamento de corpos d'água
5	1.55 - 1.75	Medidas de umidade da vegetação Diferenciação entre nuvens e neve
6	10.4 - 12.5	Mapeamento de estresse térmico em plantas Outros mapeamentos térmicos
7	2.08 - 2.35	Mapeamento hidrotermal

Tabela 1 – As diferentes faixas espectrais do sensor orbital TM e suas aplicações principais. Fonte: (CÂMARA et al., 1996)

Nota-se que os canais do sensor TM operam em faixas espectrais onde há janelas atmosféricas, ou seja, onde há maior transmitância atmosférica. Os canais de 1 a 3 trabalham dentro espectro visível (VIS — $0,4\mu m \leq \lambda_{VIS} \leq 0,7\mu m$); o canal 4 trabalha no espectro infravermelho próximo (NIR — $0,7\mu m \leq \lambda_{NIR} \leq 1,3\mu m$); os canais 5 e 7 trabalham no espectro infravermelho de ondas curtas ($SWIR$ — $1,3\mu m \leq \lambda_{SWIR} \leq 3\mu m$); o canal 6 trabalha no espectro infravermelho termal (TIR — $4\mu m \leq \lambda_{TIR} \leq 20\mu m$) (SOLIMINI, 2016).

2.3 Resolução

Para cada sensor orbital, há uma configuração específica no quesito resolução. São quatro tipos de resolução importantes para os sensores:

- Resolução espacial: é denominada como a menor dimensão que um sensor pode observar, diferenciando dois objetos distintos. Quanto menor a dimensão do objeto observável, maior (mais refinada) é a resolução espacial. A Figura 4 mostra o Distrito Federal (Brasília) observado com duas resoluções diferentes (CROSTA, 1999).
- Resolução radiométrica: pode ser descrita em função da quantidade de bits ou Níveis de Cinza contidos em uma imagem capturada por um sensor. A quantidade de bits (n) de uma imagem se relaciona com os níveis de cinza (NC) presentes na imagem por uma relação de potência na base 2: $NC = 2^n$. Isto é, uma imagem com 8 bits tem

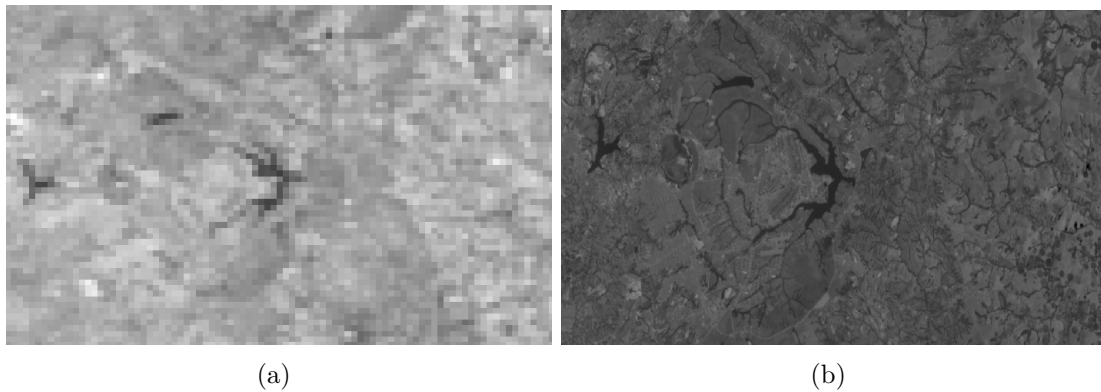


Figura 4 – Imagens adquiridas com (a) MODIS com 1 km de resolução espacial e (b) TIRS com 100 m de resolução espacial.

$2^8 = 256$ níveis de cinza (MENESES; ALMEIDA, 2012). A Figura 5 mostra os níveis diferentes níveis de detalhes adquiridos com diferentes resoluções radiométricas.

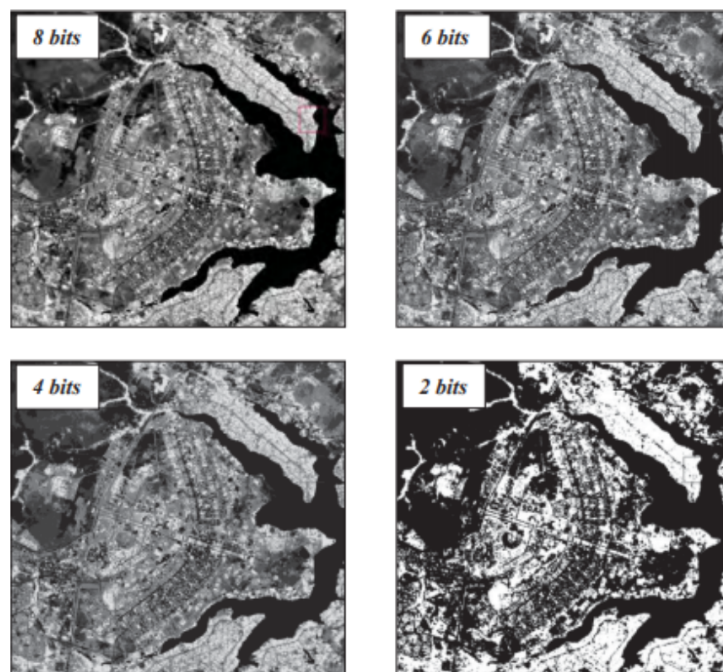


Figura 5 – Imagens adquiridas com sensores de diferentes resoluções radiométricas. Fonte: (MENESES; ALMEIDA, 2012).

- Resolução temporal: refere-se à frequência de revisita de um sistema de sensoria-mento remoto a um mesmo local. Um satélite com resolução temporal de 16 dias, por exemplo, gera imagens sobre um mesmo ponto da superfície terrestre a cada 16 dias. Esse é o caso do Landsat 8 (MENESES; ALMEIDA, 2012).
- Resolução espectral: diz respeito à três parâmetros de medida: o número de bandas que o sensor possui, a largura das bandas e a posição de cada banda no espectro eletromagnético (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.4 Sensores MODIS e OLI/TIRS

2.4.1 MODIS

O sensor MODIS (ou *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um instrumento utilizado nos satélites Terra e Aqua. Ambos têm órbita hélio-síncrona a 705 km de altitude; isso permite que os sensores MODIS/Terra e MODIS/Aqua gerem imagens semelhantes. Em conjunto, os sensores tem resolução espacial de um dia. A diferença entre as imagens geradas pelos sensores são os horários diferentes de passagem pelo equador (MODIS/Terra — 10h30min; e MODIS/Aqua — 13h30min). A alta resolução temporal de um dia vem ao custo de uma baixa resolução espacial, de 1 km.

A aquisição de dados MODIS é feita em 36 bandas diferentes, como mostra a Tabela 2.

Uso primário	Banda	Faixa espectral (nm)	Uso primário	Banda	Faixa espectral (μm)
Terreno/Nuvens/Aerossol	1	620 - 670	Temperatura do solo/nuvens	20	3,660 - 3,840
	2	841 - 876		21/22	3,929 - 3,989
Terreno/Nuvens/Aerossol	3	459 - 479		23	4,020 - 4,080
	4	545 - 565	Temperatura atmosférica	24	4,433 - 4,498
	5	1230 - 1250		25	4,482 - 4,549
	6	1628 - 1652	Nuvens cirros/Vapor de água	26	1,360 - 1,390
	7	2105 - 2155		27	6,535 - 6,895
8	405 - 420	28		7,175 - 7,475	
Cor do Oceano/ Fitoplâncton/ Biogeoquímica	9	438 - 448	Propriedades das nuvens	29	8,400 - 8,700
	10	483 - 493			
	11	526 - 536	Temperatura do solo/nuvens	31	10,780 - 11,280
	12	546 - 556			
	13	662 - 672	Altitude do topo das nuvens	33	13,185 - 13,485
	14	673 - 683			
	15	743 - 753			
	16	862 - 877			
Vapor de água atmosférico	17	890 - 920	34	13,485 - 13,785	
	18	931 - 941			
	19	915 - 965			35
		36	14,085 - 14,385		

Tabela 2 – As diferentes faixas espectrais do sensor orbital MODIS e suas aplicações principais.

Fonte: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>

2.4.2 OLI/TIRS

Os sensores OLI e TIRS são utilizados pelo Landsat 8 para fazer observação da Terra. A órbita do Landsat 8 é hélio-síncrona e tem 705 km de altitude. A resolução espacial de OLI/TIRS é de 16 dias. O horário de passagem do Landsat 8 pelo equador é 10h10min. Apesar de ter resolução temporal relativamente baixa, de 16 dias, OLI/TIRS tem alta resolução espacial.

A aquisição dos dados OLI/TIRS é feita em 11 bandas, como mostra a Tabela 3.

Uso primário	Banda	Faixa espectral (μm)
Estudos costeiros e de aerossóis	1	0,43 - 0,45
Mapeamentos batimétricos, distinção de solo e vegetação	2 - azul	0,45 - 0,51
Avaliação do vigor da vegetação	3 - verde	0,53 - 0,59
Distinção de declives na vegetação	4 - vermelho	0,64 - 0,67
Enfatiza linhas costeiras e biomassa	5 - NIR	0,85 - 0,88
Distinção de mistura de solo e vegetação	6 - SWIR 1	1,57 - 1,65
	7 - SWIR 2	2,11 - 2,29
Resolução espacial de 15m Maior definição na imagem	8 - PAN	0,50 - 0,68
Contaminação de nuvens cirros	9 - Cirrus	1,36 - 1,38
Temperatura do solo	10 - TIRS 1	10,60 - 11,19
	11 - TIRS 2	11,50 - 12,51

Tabela 3 – As diferentes faixas espectrais dos sensores OLI e TIRS, e suas aplicações principais. Fonte: <<https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-oli-and-tirs-and-their-uses>>

3 Metodologia

O objetivo desse trabalho é verificar a viabilidade da utilização dos dados adquiridos pelos sensores orbitais MODIS e OLI/TIR para identificar ICUs em Brasília. Para isso, foram escolhidos cinco locais de interesse em Brasília para a comparação desses dados, como mostra a Figura 6:

1. Lago Paranoá — Latitude: -15,8289, Longitude: -47,8454;
2. Asa Sul e Asa Norte (Plano Piloto) — Latitude: -15,7920, Longitude: -47,8822;
3. Lago do Descoberto — Latitude: -15,7451, Longitude: -48,2070;
4. Áreas habitadas em Ceilândia e Taguatinga — Latitude: -15,8179, Longitude: -48,1049;
5. Estação meteorológica no Aeroporto Internacional de Brasília — Latitude: -15,8650, Longitude: -47,9322.

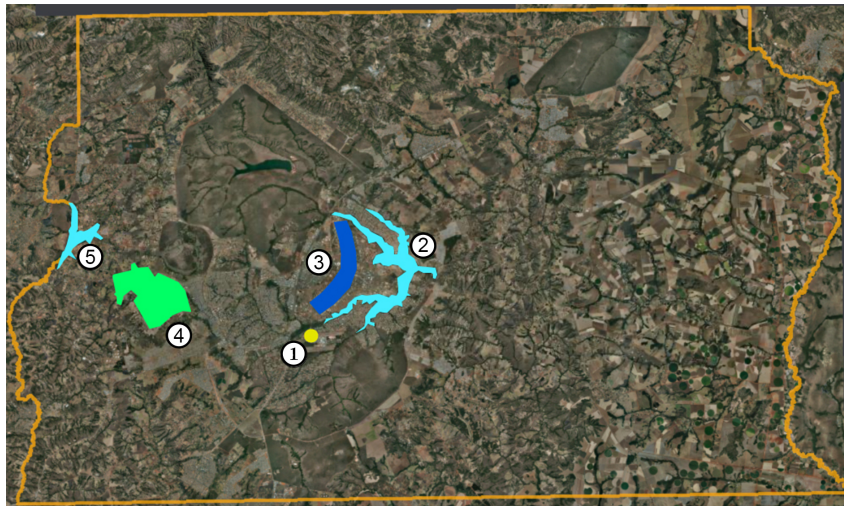


Figura 6 – Locais de interesse para comparação e validação dos dados.

Após a escolha dos locais para análise, as estações do ano de 2020 foram consideradas para realizar as comparações dos dados: Verão — 21 de dezembro de 2019 a 19 de março de 2020; Outono — 20 de março a 19 de junho de 2020; Inverno — 20 de junho a 21 de setembro de 2020; Primavera — 22 de setembro a 21 de novembro ¹.

¹ O período da primavera de 2020 compreende o período de 22 de setembro a 21 de dezembro de 2020, porém este ainda estava em curso durante a elaboração deste trabalho, portanto considerou-se o período de 22 de setembro a 21 de novembro de 2020.

As limitações para baixar os produtos são principalmente: (a) a resolução temporal dos sensores OLI/TIRS (16 dias); (b) a possibilidade de cobertura de nuvens no dia da observação. Essas limitações juntas trazem a possibilidade de não haver produtos disponíveis por longos períodos de tempo. Considerando essas limitações, imagens OLI/TIRS em algumas datas foram selecionadas.

As datas para baixar as imagens MODIS foram baseadas nas datas das imagens OLI/TIRS. Escolhidas as datas e local, o passo a passo para a validação dos dados é:

1. Baixar os produtos MODIS e OLI/TIR: nessa etapa, deve-se evitar imagens de dias nublados, pois as nuvens atrapalham a aquisição dos dados de radiância da superfície terrestre;
2. Após baixados os produtos, realizar o processamento das imagens, seguindo o fluxograma mostrado na Figura 7. Para dados OLI/TIRS, é feita uma estimativa de LSE para aprimorar a estimativa de LST. Feitas as estimativas de LST, realizar o cruzamento dos dados para validação desses dados.

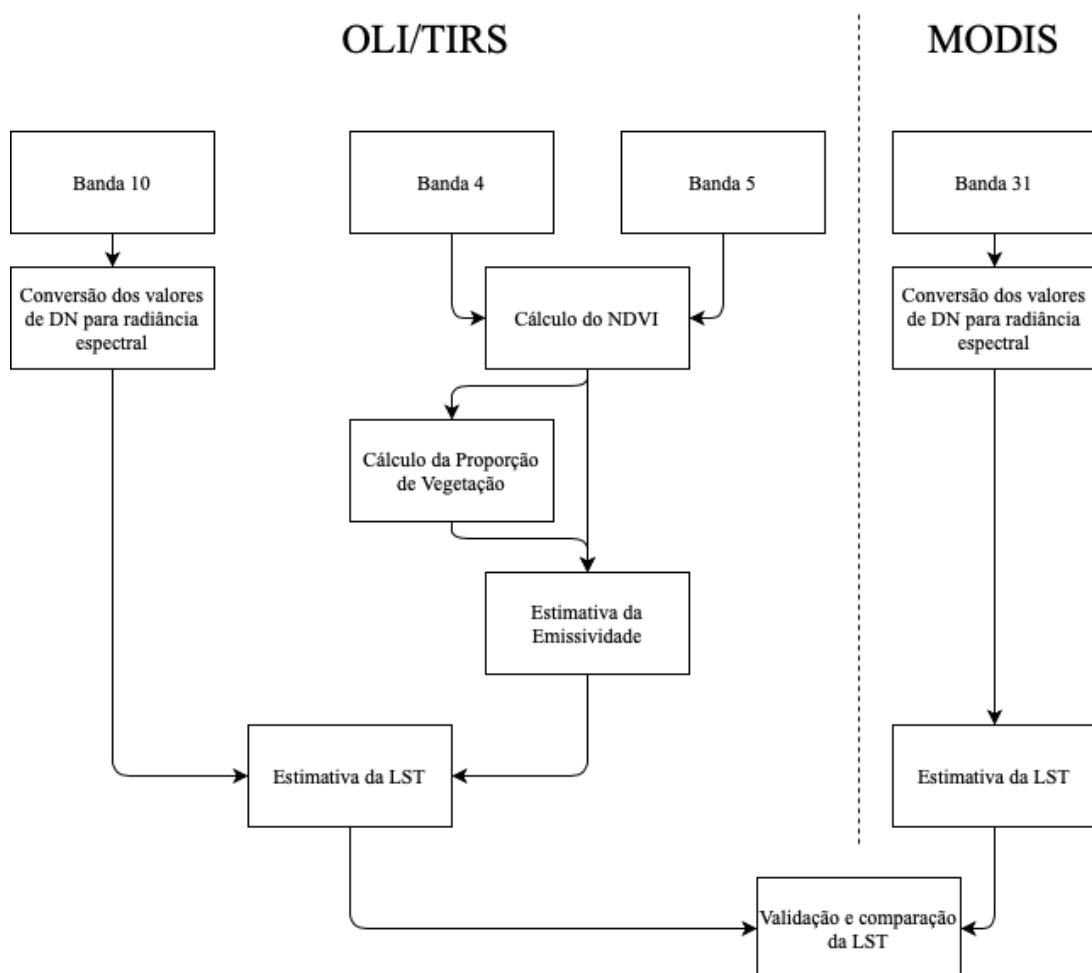


Figura 7 – Fluxograma da estimativa da LST para OLI/TIRS e MODIS.

3.1 Estimativa de LST utilizando dados OLI/TIRS

Nesta seção, o método para estimar os valores de LST para produtos OLI/TIRS será explicado em detalhes, desde o download do produto até o cálculo dos valores de temperatura. Para realizar os cálculos, um código em Matlab® foi desenvolvido (Apêndice B).

3.1.1 Download de produtos OLI/TIR

Para baixar produtos, deve-se acessar o banco de dados do USGS (*United States Geological Survey*) ([SURVEY](#),). Todos os produtos disponibilizados pelo USGS são gratuitos para download.

O passo a passo para baixar produtos OLI/TIRS é: (a) selecionar o local que se deseja observar; (b) selecionar a data em que a observação foi feita; (c) selecionar o produto desejado; por fim, será mostrada uma lista de todos os produtos que se encaixam nos critérios selecionados, e então (d) selecionar e baixar os produtos.

3.1.2 O Produto *Landsat Level-1 Precision Terrain* (L1TP)

Como mostra [Engebretson \(2017\)](#) no manual de controle de dados do Landsat 8, o produto L1TP guarda dois componentes importantes:

- Arquivo de imagem L1TP: contém um arquivo de imagem para cada banda do sensor;
- Arquivo de metadados L1TP: contém informações específicas do produto, como valores de latitude e longitudes associadas às imagens.

Cada arquivo de imagem tem seus valores armazenados em formato de números digitais (DN) em uma variável de valores inteiros escalados em 16 bits. Esses DN podem ser reescalados para reflectância (bandas 1-9), e para radiância (bandas 10 e 11) utilizando os fatores de escala presentes no metadado do produto. As imagens têm dimensão 7691×7571 . Para realizar o cálculo de LST, a banda 10 (TIRS 1) deve ser utilizada.

Apesar de a banda 11 (TIRS 2) ser uma banda térmica que poderia ser utilizada no cálculo de LST, sugere-se não utilizá-la pois foi verificado que há alterações nos valores de radiância onde a expectativa era que esses valores fossem constantes ([MONTANARO et al., 2014](#)).

3.1.3 Aquisição dos dados de radiância

Como mostra [Engebretson \(2017\)](#) no manual de controle de dados do Landsat 8, os dados de radiância podem ser obtidos utilizando a Equação 3.1:

$$L = rad_multi * SI + rad_add \quad (3.1)$$

onde *rad_multi* e *rad_add* são os fatores de escala utilizados para reescalar os DN em reflectância/radiância; e *SI* são os valores de reflectância/radiância em DN. A Figura 8 mostra uma imagem gerada com dados de radiância da banda 10 do sensor OLI/TIRS.

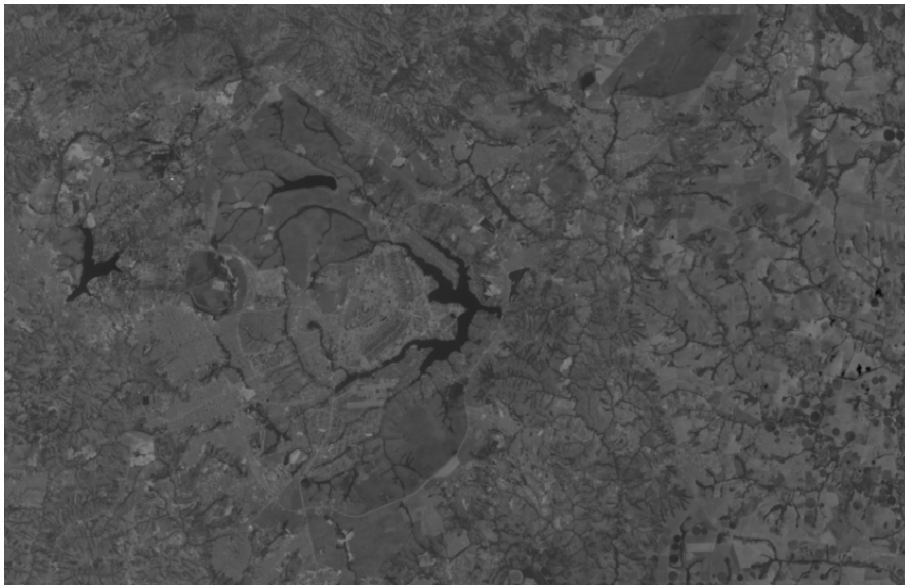


Figura 8 – Imagem do dia 2 de setembro de 2020 gerada a partir dos dados da banda 10 do sensor OLI/TIRS

3.1.4 Cálculo da Temperatura de Brilho

Uma diferença entre a estimativa de LST para MODIS e OLI/TIRS é que, para OLI/TIRS, o método NTM é utilizado para estimar valores de emissividade. Dessa forma, pode-se utilizar a Equação 2.7 para o cálculo de temperatura:

$$BT = \frac{K_2}{\ln(\varepsilon_\lambda K_1 / E_{b\lambda} + 1)} \quad [K]$$

Os valores de K_1 e K_2 são função do comprimento de onda, que nesse caso é o comprimento de onda central da banda 10, $\lambda = 10,895\mu m$. Os valores de emissividade são calculados pixel a pixel com o método NTM (*NDVI Threshold Method*), como explicado na Seção 3.1.5.

3.1.5 Método NTM (NDVI *Threshold Method*) para estimar a Emissividade da Superfície Terrestre (LSE)

Há diversas aplicações para os dados adquiridos por sensores orbitais. Uma das aplicações importantes é o uso do NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada) para estimativas de área verde. NDVI é um índice adimensional que pode ser calculado como:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (3.2)$$

onde ρ_{nir} é a reflectância no espectro NIR ($\approx 0,86\mu m$), e ρ_{red} é a reflectância no espectro vermelho ($\approx 0,66\mu m$). O valor de NDVI pode variar de -1 a 1. Valores negativos ou próximos a 0 indicam áreas de água, edificações ou solo nú, enquanto que valores altos e próximos a 1 indicam alta atividade vegetativa.

O NDVI pode ser usado, também, para estimativa da LSE (*Land Surface Emissivity* — LSE) com o método NTM (NDVI *Threshold Method*). Este método é válido somente para a banda 10 do Landsat 8. O método NTM propõe que valores de emissividade estão associados a valores de NDVI (SOBRINO; JIMÉNEZ-MUÑOZ; PAOLINI, 2004). De acordo com Reddy e Manikiam (2017), para a banda 10 (TIRS — $10,60\mu m$ - $11,19\mu m$) do Landsat 8, o valor de LSE pode ser estimado como:

- para $NDVI < 0$, $\varepsilon = 0,991$;
- $0 \leq NDVI \leq 0,2$, $\varepsilon = \varepsilon_S = 0,966$;
- $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$, o pixel é classificado como uma mistura de solo e vegetação, a emissividade pode ser calculada pela equação 3.3;
- $NDVI > 0,5$, o pixel é classificado como vegetação, $\varepsilon = \varepsilon_V = 0,973$.

$$\varepsilon = \varepsilon_V P_V + \varepsilon_S (1 - P_V) + d\varepsilon \quad (3.3)$$

onde ε_V é a emissividade da vegetação, ε_S é a emissividade do solo, $d\varepsilon$ é uma constante associada a rugosidade do solo, com valor de 0,005 (SOBRINO; RAISSOUNI, 2000), e P_V é a proporção de vegetação, que pode ser calculada como:

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (3.4)$$

onde $NDVI_{max} = 0,5$ e $NDVI_{min} = 0,2$.

3.2 Estimativa de LST utilizando dados MODIS

Nessa seção, o método para estimar a LST para produtos MODIS será explicado em detalhes, desde o download do produto até o cálculo de LST. Para realizar os cálculos, um código em Matlab® foi desenvolvido (Apêndice A).

3.2.1 Download de produtos MODIS

Para baixar produtos MODIS, deve-se acessar o LAADS DAAC (*Level-1 and Atmosphere Archive Distribution System Distributed Active Archive Center*), pois este serve como banco de dados para os satélites Terra e Aqua, que carregam sensores MODIS. Todos os produtos são gratuitos para download.

Para baixar os produtos, deve-se seguir um passo a passo: (a) selecionar o produto desejado; (b) selecionar a data em cuja observação foi realizada; (c) selecionar o local que se deseja observar; por fim será apresentada uma lista de produtos que se encaixam nos parâmetros selecionados, e então (d) selecionar e baixar os produtos.

3.2.2 O Produto MODIS Level 1B

O produto utilizado para fazer a estimativa de LST é desenvolvido pelo MSCT (*MODIS Characterization and Support Team*) cujo objetivo é providenciar dados MODIS calibrados para uso em ciências da Terra (TOLLER et al., 2003). Se utiliza o produto Level-1B, que contém os componentes importantes:

- Dados científicos pixel a pixel: estes valores podem ser convertidos para radiância ou reflectância, conforme apropriado para a banda;
- Geolocalização para os pixels: estes dados incluem latitude e longitude associados a subconjuntos de pixels;
- Metadados: estes dados contém uma variedade de informações auxiliares para cada arquivo.

Os Dados Científicos são separados em grupos de bandas, como mostra a Tabela 4. Para calcular a LST, se utiliza o agrupamento EV_1KM_Emissive, pois é nele onde estão armazenados os dados de radiância nas bandas térmicas associadas a temperatura da Terra. O agrupamento EV_1KM_Emissive é uma matriz $16 \times 2030 \times 1354$ que armazena 16 matrizes 2030×1354 , em 16 bits. Cada matriz corresponde a uma das bandas espectrais do sensor.

Nome	Resolução	N de bandas	Bandas espectrais
EV_250_RefSB	250 m	2	1, 2
EV_500_RefSB	500 m	5	3, 4, 5, 6, 7
EV_1KM_RefSB	1 km	15	8-19, 26
EV_1KM_Emissive	1 km	16	20-25, 27-36

Tabela 4 – Agrupamentos em bandas espectrais do produto Level 1B. Nota: *RefSB* significa Banda Solar Reflexiva, e *Emissive* significa Banda Emissiva Termal. Fonte: (TOLLER et al., 2003).

3.2.3 Aquisição dos dados de radiância

Como mostra Toller et al. (2003) no Guia de Produtos MODIS, os valores de radiância podem ser obtidos utilizando a Equação 3.5:

$$L = rad_scales * (SI - rad_offsets) \quad [W/m^2/m/sr] \quad (3.5)$$

onde rad_scales [$W/m^2/m/sr$] e $rad_offsets$ [*adimensional*] são fatores de escala utilizados unicamente para escalar e reescalar os valores de radiância em SI ou, de volta para radiância; e SI são os valores de radiância escalados para valores inteiros em 16 bits.

A Figura 9 mostra os uma imagem gerada com dados de radiância do agrupamento EV_1KM_Emissive.



Figura 9 – Imagem do dia 2 de setembro de 2020, as 13h35min, gerada a partir dos dados da banda 31 do sensor MODIS/Terra.

3.2.4 Cálculo da Temperatura de Brilho

A temperatura pode ser calculada utilizando a lei de Planck invertida (Equação 2.6):

$$BT = \frac{K_2}{\ln(K_1/E_{b\lambda} + 1)} \quad [K]$$

onde $K_1 = 2\pi hc_0^2 \lambda^{-5}$ e $K_2 = hc_0/k\lambda$, λ é o comprimento de onda da radiação emitida e $k = 1,38065 \times 10^{-23} J/K$ é a constante de Boltzmann; $h = 6,626 * 10^{-34}$ é a constante de Planck, $c_0 = 2,99792458 * 10^8$ é a velocidade da luz.

Os valores de K_1 e K_2 são diretamente dependentes do comprimento de onda λ , portanto dependem da faixa espectral utilizada. Neste caso, como se deseja calcular a temperatura, deve-se utilizar a banda 31, cujo comprimento de onda central é $\lambda = 11,03\mu m$.

Utilizando dados MODIS, para obter os dados de temperatura, a lei de Planck invertida deve ser aplicada pixel a pixel. Estes cálculos foram feitos como mostra o código no Apêndice A.

4 Resultados & Conclusão

Neste capítulo, será apresentado o resultado das comparações dos dados de LST gerados pelos sensores MODIS, OLI/TIRS, e as medições in situ. As imagens utilizadas para comparar os dados de LST estão no Apêndice C.

Vale ressaltar que não foi possível adquirir produtos OLI/TIRS e MODIS/Terra nos mesmos dias, portanto, os dados LST desses produtos foram comparados entre si apenas para verificar a ordem de grandeza. De forma análoga, produtos OLI/TIRS e MODIS/Aqua são comparados apenas para verificar a ordem de grandeza, visto que o sensor MODIS/Aqua passa por Brasília aproximadamente as 17h05min (3h depois dos outros sensores). Apesar disso, visto que os dados de temperatura medidas in situ nos horários próximos das aquisições dos dados OLI/TIRS e MODIS estão disponíveis ([Weather Wunderground](#)), todas os dados de LST calculados (para o local de interesse n° 1) foram comparados com as medições in situ.

Vale ressaltar, também, que a porcentagem de dias com céu encoberto em Brasília sofre variações sazonais extremas. No período analisado, o outono teve cerca de 50% de seus dias quase sem nuvens ou sem nuvens; o inverno teve cerca de 70% de seus dias quase sem nuvens ou sem nuvens. Essa porcentagem de cobertura de nuvens facilitou a aquisição de imagens. No verão e na primavera, cerca de 80% dos dias foi parcialmente encoberto ou encoberto, o que dificultou a aquisição de imagens sensores MODIS e OLI/TIRS ([SPARK, 2020](#)).

4.1 Verão — 21 de dezembro de 2019 a 19 de março de 2020

No período do verão, não foi possível adquirir produtos OLI/TIRS, pois Brasília estava encoberta em todos os horários de passagem do sensor. A Figura 10 mostra as LST estimadas para MODIS/Terra no período do verão. A Tabela 5 mostra a comparação entre LST MODIS/Terra e as medições in situ.

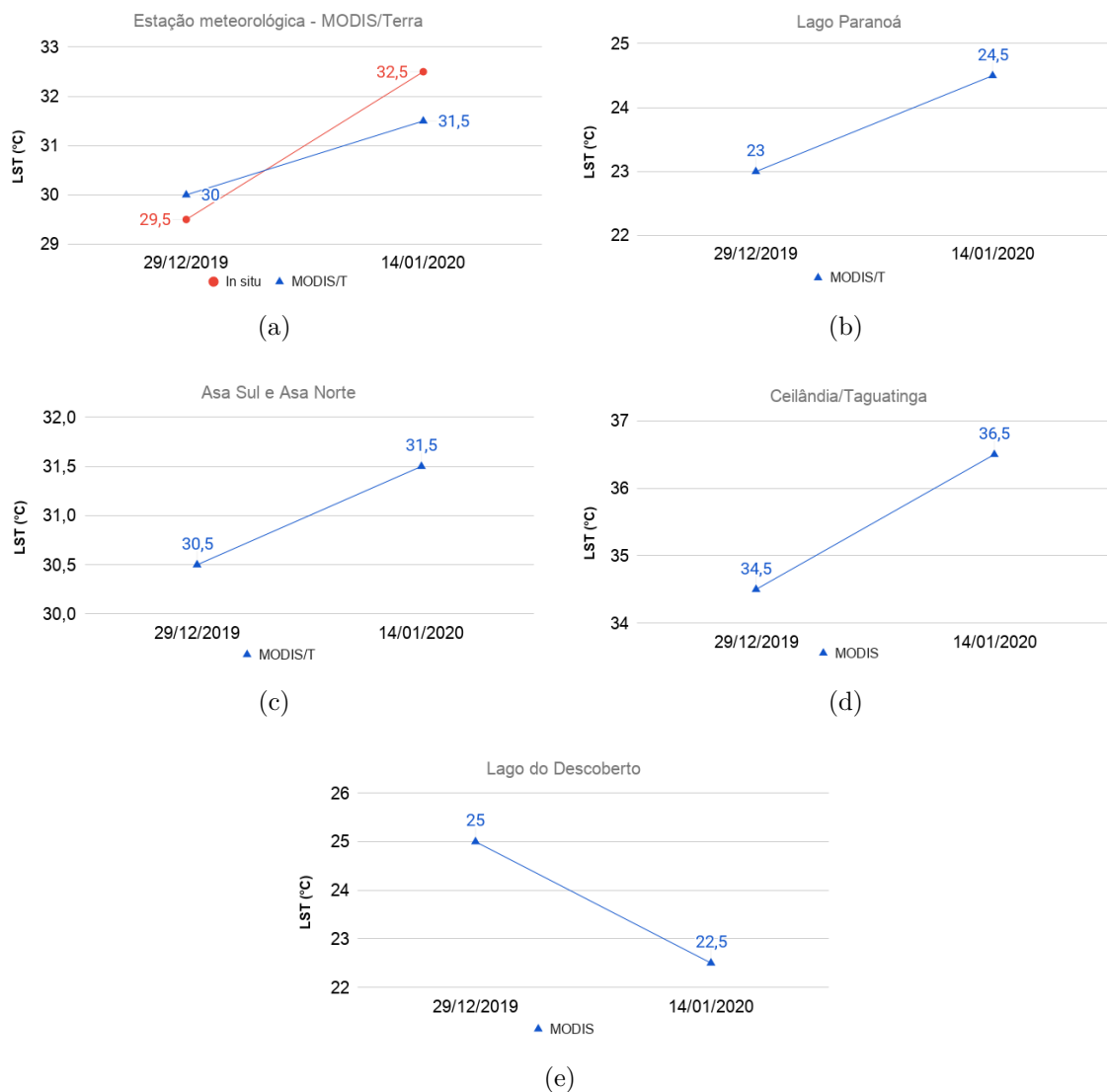


Figura 10 – LST MODIS/Terra nos locais de interesse (a) n°1, (b) n°2, (c) n°3, (d) n°4 e (e) n°5 — Verão.

	ΔT_{max}	ΔT_{min}	$\Delta T_{média}$
MODIS/Terra	1°C	0,5°C	0,75°C

Tabela 5 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Verão.

4.2 Outono — 20 de março a 19 de junho de 2020

A Figura 11 mostra as LST OLI/TIRS e MODIS estimadas no período do outono. Nas Figuras 11(a) e 11(b), e na Tabela 6 são mostradas comparações entre as estimativas de LST e as medições in situ.

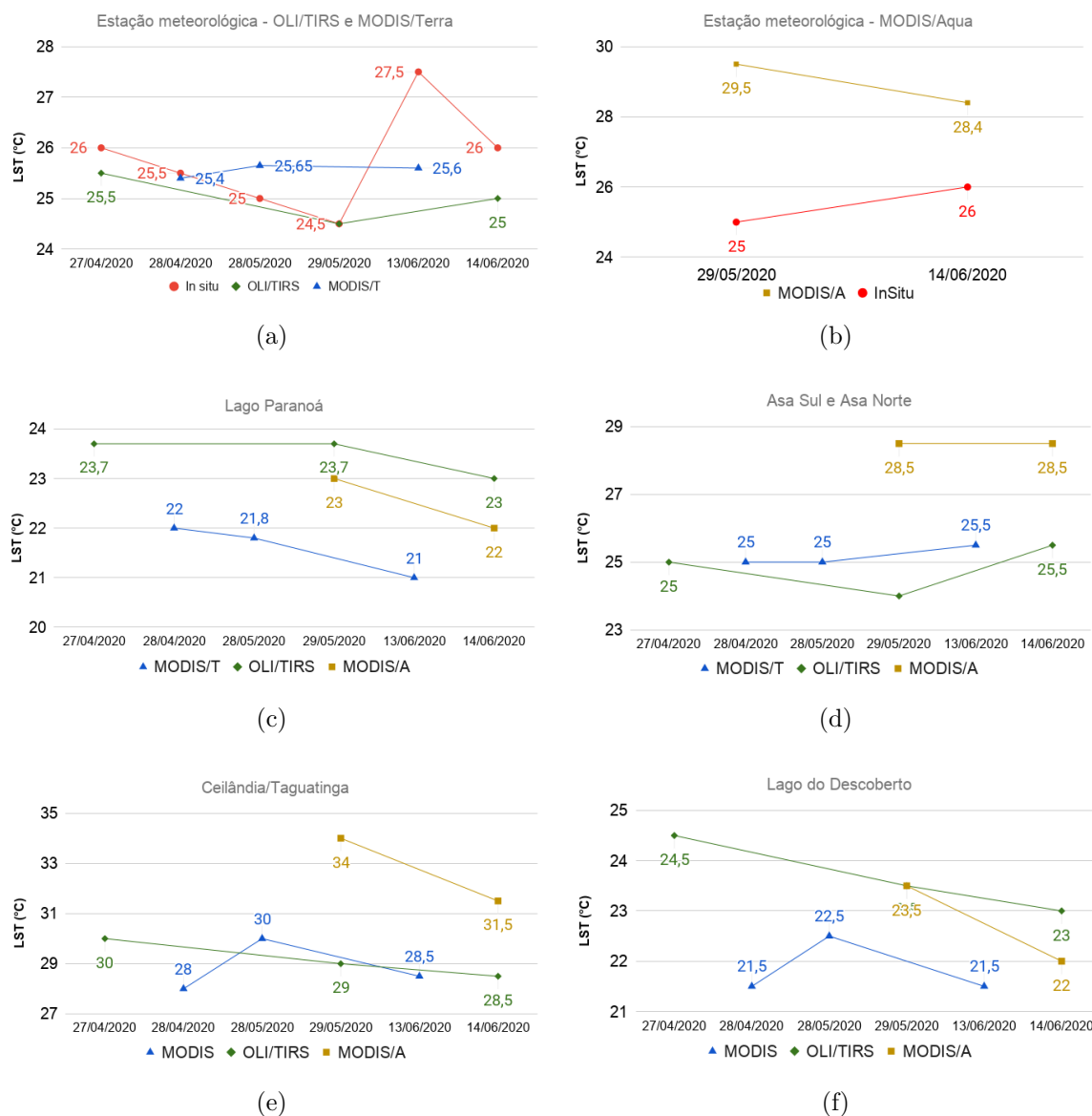


Figura 11 – LST MODIS/Terra, MODIS/Aqua e OLI/TIRS nos locais de interesse (a) n°1, (b) n°2, (c) n°3, (d) n°4, e (e) n°5 — Outono.

	ΔT_{max}	ΔT_{min}	$\Delta T_{média}$
OLI/TIRS	1°C	0°C	0,5°C
MODIS/Terra	1,9°C	0,1°C	0,88°C

Tabela 6 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Outono.

4.3 Inverno — 20 de junho a 21 de setembro de 2020

A Figura 12 mostra as LST OLI/TIRS e MODIS/Terra estimadas no período do inverno. A Figura 12(a) e a Tabela 7 mostram as comparações de LST e as medições in situ.

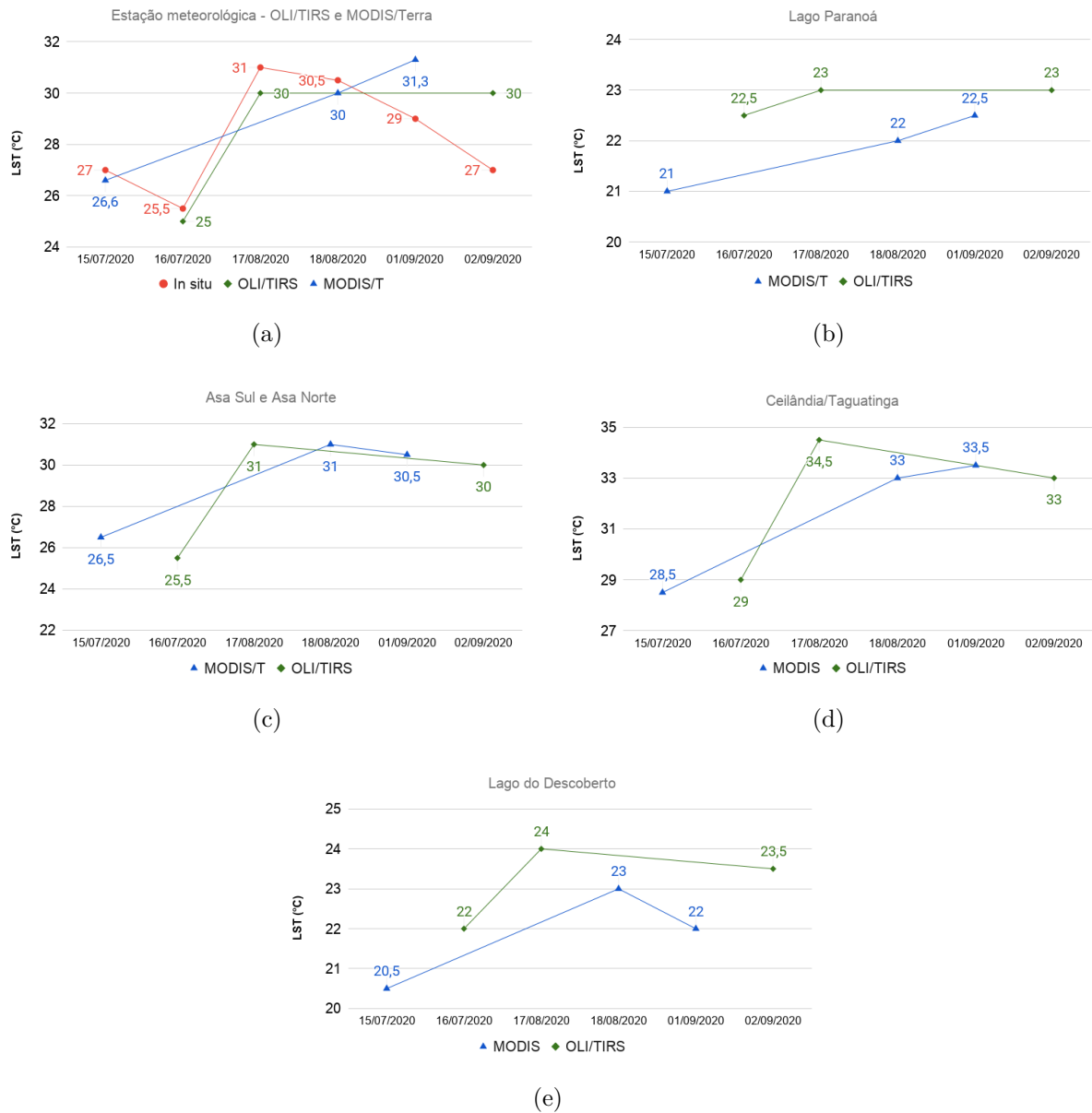


Figura 12 – LST MODIS/Terra e OLI/TIRS nos locais de interesse (a) n°2, (b) n°3, (c) n°4 e (d) n°5 — Inverno.

	ΔT_{max}	ΔT_{min}	$\Delta T_{média}$
OLI/TIRS	3°C	0,5°C	1,5°C
MODIS/Terra	1,3°C	0,4°C	0,7°C

Tabela 7 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Inverno.

4.4 Primavera — 22 de setembro a 21 de novembro de 2020

Na primavera, cerca de 80% dos dias foi parcialmente encoberto ou encoberto. Além disso, a primavera ainda estava em curso durante a elaboração deste trabalho, portanto há menos produtos nesse período. A Figura 13 mostra as LST OLI/TIRS e MODIS estimadas no período da primavera. A Figura 13(a) e a Tabela 8 mostram as comparações entre LST estimadas e as medições in situ.

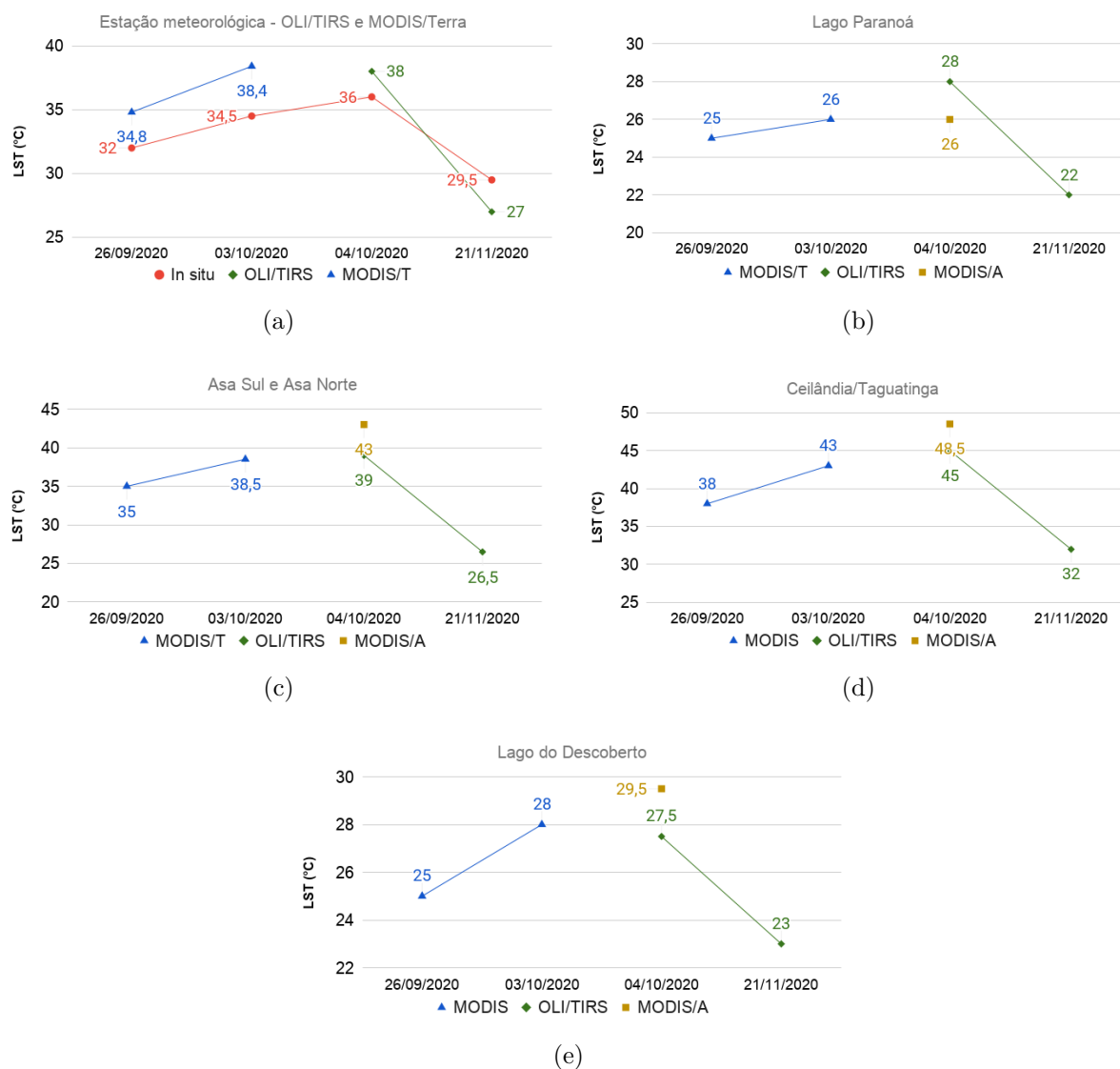


Figura 13 – LST MODIS/Terra, MODIS/Aqua e OLI/TIRS nos locais de interesse (a) n°1, (b) n°2, (c) n°3, (d) n°4 e (d) n°5 — Primavera.

	ΔT_{max}	ΔT_{min}	$\Delta T_{média}$
OLI/TIRS	2,5°C	2°C	2,25°C
MODIS/Terra	3,9°C	2,8°C	3,35°C

Tabela 8 – Diferenças máxima, mínima e média entre LST e medições in situ — Primavera.

4.5 Comparação entre os locais de interesse

As temperaturas médias, nos locais de interesse analisados, em cada estação, são mostradas na Figura 14. Desses gráficos, nota-se que as temperaturas dos lagos são semelhantes em todas as estações; e são sempre mais baixas que as temperaturas em áreas urbanas.

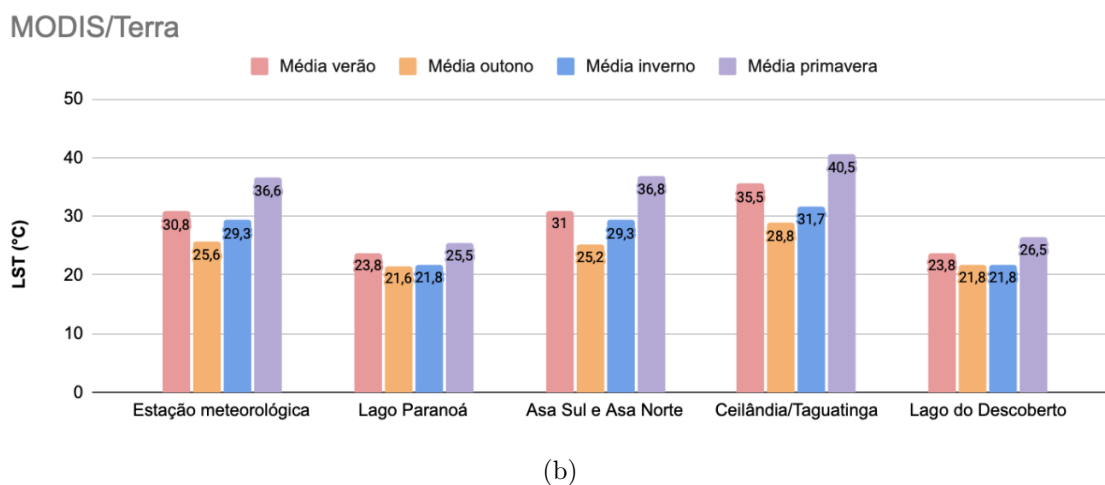
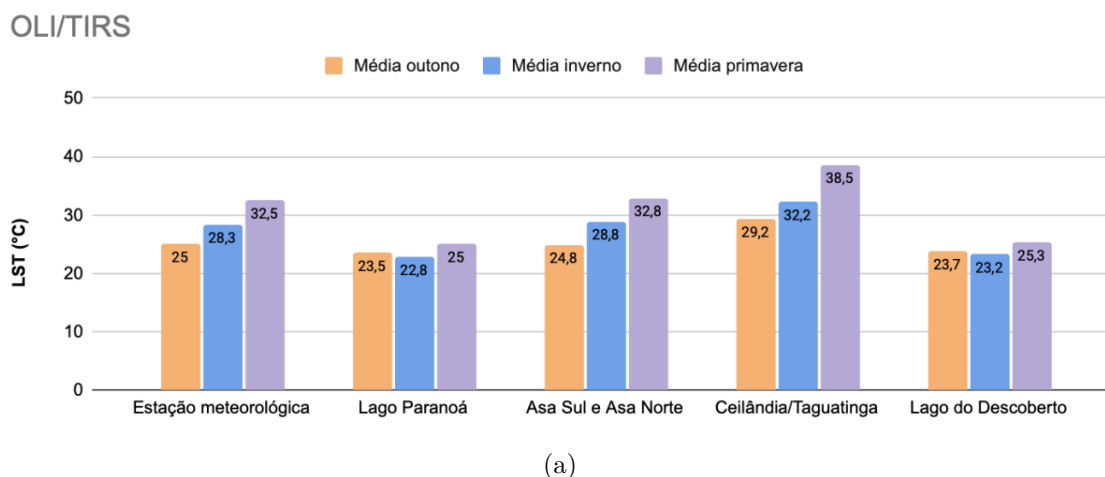


Figura 14 – LST médias estimadas para cada estação para os sensores (a) OLI/TIRS e (b) MODIS/Terra.

Nota-se também que o local de interesse n° 4 teve as temperaturas mais altas em todas as estações. A Tabela 9 mostra a diferença das médias de temperatura nos locais de interesse n° 4 e n° 3.

	Verão	Outono	Inverno	Primavera
OLI/TIRS	—	4,4°C	3,4°C	5,7°C
MODIS	4,5°C	3,6°C	2,4°C	3,7°C

Tabela 9 – Diferenças entre as médias de LST dos locais de interesse n° 4 e n° 3 (Ceilândia/Taguatinga, e Asa Sul e Asa Norte, respectivamente).

4.6 Discussão

Das análises feitas, foi possível observar que, apesar de terem sido calculados com base em dias diferentes, os valores médios de LST OLI/TIRS foram próximos dos valores médios de LST MODIS/Terra em todas as estações. Cabe ressaltar que o horário de passagem dos sensores (MODIS/Terra e OLI/TIRS) sobre Brasília é, aproximadamente, 13h30min, que é um horário próximo das medições de temperatura máxima do dia, portanto, as estimativas de LST feitas nesse trabalho podem ser associadas às temperaturas máximas do período.

Dito isso, vale lembrar que a estimativa de LST OLI/TIRS levou em conta a estimativa de LSE, enquanto a estimativa de LST MODIS não, portanto, sabe-se que a estimativa de LST OLI/TIRS é mais precisa. Em contraponto, durante o período analisado, apenas 8 produtos OLI/TIRS estiveram disponíveis; e no período do verão, não houve produtos OLI/TIRS disponíveis. Essa seria a limitação de se utilizar apenas produtos OLI/TIRS para estimar a LST, por esse motivo, se utilizou produtos MODIS em conjunto.

As diferenças médias entre as estimativas de LST e as medições *in situ* são mostradas nas Tabelas 5, 6, 7 e 8. Observa-se que as diferenças máximas ocorreram na primavera, período em que se mediram as maiores temperaturas; e as diferenças mínimas ocorreram no outono, período em que se mediram as menores temperaturas. Esse comportamento já foi observado, como mostra Käfer et al. (2020).

4.7 Conclusão

A LST estimada para ambos OLI/TIRS e MODIS foi comparada com as medições *in situ* e a diferença média de todas as comparações é de 1,42°C para ambos os sensores. Isso mostra que a identificação de ICUs pode ser realizada com os sensores OLI/TIRS e MODIS, levando em consideração a diferença média de 1,42°C entre as temperaturas estimadas pela metodologia descrita nesse trabalho e as temperaturas medidas *in situ*.

Em trabalhos futuros, para aprimorar o quão diferentes são as estimativas LST e medições *in situ*, mais amostras de produtos podem ser avaliadas em um período de tempo maior. Além disso, o método para estimar a LST MODIS pode ser aprimorado considerando a LSE, e ambos os métodos para estimar a LST (OLI/TIRS e MODIS) podem ser aprimorados para considerar efeitos atmosféricos, como a umidade do ar, que varia consideravelmente com as variações sazonais.

Apêndices

APÊNDICE A – Código utilizado para o cálculo do LST utilizando dados MODIS

```

1 %% Constantes para calcular BT
2
3 clc
4 clear
5
6 c = 2.99792458e8; % speed of light m/sec
7 h = 6.626076e-34; % Plank's constant J*sec
8 k = 1.380658e-23; % Boltzman constant J/K
9
10 c1w = 2*h*c^2; % W*m^2
11 c2w = h*c/k; % m*K
12
13 %% Ler os dados arquivo HDFMODIS
14
15 data_path = "/Users/rafaelrodrigues/Desktop/UnB 2020/TCC2/MODIS Files/
    imgVerao/MOD021KM.A2020001.1400.061.2020002184309.hdf";
16 Emissive_path = '/MODIS_SWATH_Type_L1B/Data Fields/EV_1KM_Emissive';
17
18 start = [1 1 1];
19 stride = [1 1 1];
20 edge = [16 2030 1354];
21
22 Emissive_data = hdfread(data_path, Emissive_path, 'Index', {start,
    stride, edge});
23 Emissive_chan = double(Emissive_data);
24
25 %% Transformar DN em Radi ncia
26
27 rad_scales = [6.2624e-005 0.0031495 6.9216e-005 7.9104e-005
28               3.1556e-005 5.6398e-005 0.00011756 0.00019245
29               0.00053249 0.00040632 0.00084002 0.0007297
30               0.00026226 0.0002007 0.00017671 0.00011834];
31
32 rad_offsets = [2730.5835 2730.5835 2730.5835 2730.5835
33                1077.4448 1560.3334 2730.5833 2317.4883
34                2730.5835 1560.3333 1577.3397 1658.2213
35                2501.2976 2501.2976 2501.2979 2501.2979];
36
37 [nim, nr, nc] = size(Emissive_chan);

```



```
38
39 Radiance = zeros(16, nr, nc);
40 for k = 1:16
41     for i = 1:nr
42         for j = 1:nc
43             Radiance(k, i, j) = rad_scales(k) * (Emissive_chan(k, i, j)
44             - rad_offsets(k));
45         end
46     end
47
48 % rad1 = reshape(Radiance(2, :, :), 2030, 1354);
49 % rad2 = reshape(Radiance(11, :, :), 2030, 1354);
50 % figure(1)
51 % imagesc(rad2)
52
53 %% C lculo da BT
54
55 imm = [2, 11, 12]; % Bands 20, 31 and 32
56 wavem = [3.96, 11.03, 12.03];
57
58 BT = zeros(3, nr, nc);
59 for k = 1:3
60     for i = 1:nr
61         for j = 1:nc
62             BT(k, i, j) = c2w * 10^6 / wavem(k) / log(1+c1w * 10^24 / (
63             Radiance(imm(k), i, j) * wavem(k)^5));
64         end
65     end
66
67 %% Box geogr fico de Bras lia
68
69 lat = [-15.430, -16.118];
70 lon = [-48.298, -47.221];
71
72 geo_path_lat = '/MODIS_SWATH_Type_L1B/Geolocation Fields/Latitude';
73 geo_path_lon = '/MODIS_SWATH_Type_L1B/Geolocation Fields/Longitude';
74
75 lat_matrix = hdfread(data_path, geo_path_lat, 'Index', {[1 1],[1
76     1],[406 271]});
77 lon_matrix = hdfread(data_path, geo_path_lon, 'Index', {[1 1],[1
78     1],[406 271]});
79
79 [nrc, ncc] = size(lat_matrix);
```

```
80 Lat = zeros((nrc - 1) * 5 + 1, (ncc - 1) * 5 + 1); % Allocating memory
    for Latt Matrix before entering For loop
81 Lon = zeros((nrc - 1) * 5 + 1, (ncc - 1) * 5 + 1); % Allocating memory
    for Longt Matrix before entering For loop
82
83 for i = 1:nrc
84     for j = 1:ncc
85         rig = (i - 1) * 5 + 1;
86         col = (j - 1) * 5 + 1;
87         for k = rig:rig + 4
88             for kk = col:col + 4
89                 Lat(k, kk) = lat_matrix(i, j);
90                 Lon(k, kk) = lon_matrix(i, j);
91             end
92         end
93     end
94 end
95
96 BT21 = zeros(nr, nc);
97 BT31 = zeros(nr, nc);
98 BT32 = zeros(nr, nc);
99 Rad21 = zeros(nr, nc);
100 Rad31 = zeros(nr, nc);
101 Rad32 = zeros(nr, nc);
102
103 for i = 1:nr
104     for j = 1:nc
105         if Lat(i, j) < lat(1) && Lat(i, j) > lat(2)
106             if Lon(i, j) > lon(1) && Lon(i, j) < lon(2)
107                 BT21(i, j) = BT(1, i, j);
108                 BT31(i, j) = BT(2, i, j);
109                 BT32(i, j) = BT(3, i, j);
110                 Rad21(i, j) = Radiance(2, i, j);
111                 Rad31(i, j) = Radiance(11, i, j);
112                 Rad32(i, j) = Radiance(12, i, j);
113             end
114         end
115     end
116 end
117
118 Rad31(Rad31 == 0) = nan;
119
120 BT21(BT21 == 0) = nan;
121 BT31(BT31 == 0) = nan; % Remove 0 valued pixels
122 BT32(BT32 == 0) = nan;
123 figure(1)
124 imagesc(Rad31)
```

```
125 figure(3)
126 BrightnessTemperature = (BT31 - 273.15);
127
128 %%
129 imagesc(BrightnessTemperature)
130 colormap(gray);
131 c = colorbar;
132 c.Label.String = 'LST ( C )';
133 title('LST MODIS - Bras lia')
134 axis equal
```

APÊNDICE B – Código utilizado para o cálculo do LST utilizando dados OLI/TIRS

```

1
2 %%
3 % c_image -> this c is for OLI + TIRS
4
5 clc
6 clear
7
8 %% Constantes para calcular BT
9
10 c = 2.99792458e8; % speed of light m/sec
11 h = 6.626076e-34; % Plank's constant J*sec
12 k = 1.380658e-23; % Boltzman constant J/K
13
14 c1w = 2*h*c^2; % W*m^2
15 c2w = h*c/k; % m*K
16
17
18 %% Transformar DN em Radiancia
19
20 % Radiance scales used to transform DN into Radiance. Multi in W/(m^2 sr
21 % um)/DN and Add in W/(m^2 sr um).
22
23 rad_multi = [1.2337E-02, 1.2633E-02, 1.1642E-02, 9.8169E-03, 6.0075E-03,
24             1.4940E-03, 5.0356E-04, 1.1110E-02, 2.3478E-03, 3.3420E-04, 3.3420E
25             -04];
26 rad_add = [-61.68622, -63.16744, -58.20826, -49.08448, -30.03725,
27            -7.46999, -2.51779, -55.55012, -11.73924, 0.10000, 0.10000];
28 Qcal_B10 = Tiff("/Users/rafaelrodrigues/Desktop/UnB 2020/TCC2/Landsat 8
29             Files/imgPrimavera/LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT/
30             LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT_B10.TIF", 'r');
31 Qcal_B11 = Tiff("/Users/rafaelrodrigues/Desktop/UnB 2020/TCC2/Landsat 8
32             Files/imgPrimavera/LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT/
33             LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT_B11.TIF", 'r');
34
35 Qcal = [Qcal_B10, Qcal_B11];
36 N = 7691;
37 M = 7571;
38
39 SI = zeros(numel(Qcal), N, M);

```

```
33 for i = 1:numel(Qcal)
34     SI(i, :, :) = Qcal(i).read();
35 end
36 SI1 = reshape(SI(1, :, :), N, M);
37
38
39 imm = [10, 11];
40 nk = numel(Qcal);
41 ni = N;
42 nj = M;
43
44 Radiance = zeros(nk, ni, nj);
45 for k = 1:nk
46     for i = 1:ni
47         for j = 1:nj
48             if SI(k, i, j) == 0
49                 Radiance(k, i, j) = nan;
50             else
51                 Radiance(k, i, j) = rad_multi(imm(k)) * SI(k, i, j) +
rad_add(imm(k));
52             end
53         end
54     end
55 end
56
57 %% C lculo do NDVI
58 red_data = Tiff("/Users/rafaelrodrigues/Desktop/UnB 2020/TCC2/Landsat 8
Files/imgPrimavera/LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT/
LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT_B4.TIF", 'r');
59 nir_data = Tiff("/Users/rafaelrodrigues/Desktop/UnB 2020/TCC2/Landsat 8
Files/imgPrimavera/LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT/
LC08_L1TP_221071_20201121_20201122_01_RT_B5.TIF", 'r');
60
61 red16bit = red_data.read();
62 nir16bit = nir_data.read();
63
64 red = double(red16bit);
65 nir = double(nir16bit);
66
67 ndviMax = 0.5;
68 ndviMin = 0.2;
69
70 ndvi = zeros(N, M);
71 ndviPv = zeros(N, M);
72
73 for i = 1:N
74     for j = 1:M
```

```
75     ndvi(i, j) = (nir(i, j) - red(i, j))/(nir(i, j) + red(i, j));
76
77     if ndvi(i, j) > 0.5
78         ndviPv(i, j) = 0.5;
79     elseif ndvi(i, j) < 0.2
80         ndviPv(i, j) = 0.2;
81     else
82         ndviPv(i, j) = ndvi(i, j);
83     end
84 end
85 end
86
87 %% C lculo da propor o de vegeta o
88
89 pv = zeros(N, M);
90 for i = 1:N
91     for j = 1:M
92         pv(i, j) = ((ndviPv(i, j) - ndviMin)/(ndviMax - ndviMin));
93     end
94 end
95
96 %% C lculo da emissividade
97
98 emissivity = zeros(N, M);
99 for i = 1:N
100     for j = 1:M
101         if ndvi(i, j) >= 0.5
102             emissivity(i, j) = 0.973;
103         elseif ndvi(i, j) < 0.5 && ndvi(i, j) > 0.2
104             emissivity(i, j) = 0.973 * pv(i, j) + 0.966 * (1 - pv(i, j))
105             + 0.005;
106         elseif ndvi(i, j) <= 0.2
107             emissivity(i, j) = 0.966;
108         elseif ndvi(i, j) < 0
109             emissivity(i, j) = 0.991;
110         end
111     end
112 end
113
114 %% C lculo da BT
115
116 % imm = indexes of bands 10 and 11 used for Radiance calculation
117 imm = [1, 2];
118 lambda = [10.895, 12.005];
119
120 BT = zeros(2, ni, nj);
```

```
121 for k = 1:2
122     for i = 1:ni
123         for j = 1:nj
124             BT(k, i, j) = c2w*10^6 / lambda(k) / (log(1 + emissivity(i,
125                 j) * c1w * 10^24 * lambda(k)^(-5)/Radiance(imm(k), i, j)));
126         end
127     end
128 %% Box geográfico de Brasília
129
130 lat = [-15.430, -16.118];
131 lon = [-48.298, -47.221];
132
133 CORNER_UL_LAT = -14.84703;
134 CORNER_UL_LON = -48.96716;
135 CORNER_UR_LAT = -14.87379;
136 CORNER_UR_LON = -46.85896;
137 CORNER_LL_LAT = -16.92759;
138 CORNER_LL_LON = -49.00819;
139 CORNER_LR_LAT = -16.95831;
140 CORNER_LR_LON = -46.87824;
141
142 lat_size = CORNER_LR_LAT - CORNER_UL_LAT;
143 lat_step = lat_size / ni;
144 lat_value = CORNER_UL_LAT;
145
146 lon_size = CORNER_UR_LON - CORNER_LL_LON;
147 lon_step = lon_size / nj;
148 lon_value = CORNER_LL_LON;
149
150 Lat_Matrix = zeros(ni, nj);
151 Lon_Matrix = zeros(ni, nj);
152
153 for j = 1:nj
154     for i = 1:ni
155         Lat_Matrix(i, j) = lat_value;
156         lat_value = lat_value + lat_step;
157     end
158     lat_value = CORNER_UL_LAT;
159 end
160
161 for i = 1:ni
162     for j = 1:nj
163         Lon_Matrix(i, j) = lon_value;
164         lon_value = lon_value + lon_step;
165     end
166     lon_value = CORNER_LL_LON;
```

```
167 end
168
169 BT1 = reshape(BT(1, :, :), ni, nj);
170 for i = 1:ni
171     for j = 1:nj
172         if Lat_Matrix(i, j) > lat(1) || Lat_Matrix(i, j) < lat(2)
173             BT1(i, j) = nan;
174         end
175         if Lon_Matrix(i, j) < lon(1) || Lon_Matrix(i, j) > lon(2)
176             BT1(i, j) = nan;
177         end
178     end
179 end
180
181
182 %%
183 rad1 = reshape(Radiance(1, :, :), ni, nj);
184 figure(2)
185 imagesc(rad1)
186
187 figure(1)
188 BrightnessTemperature = (BT1 - 273.15);
189 imagesc(BrightnessTemperature)
190 colormap(gray);
191 c = colorbar;
192 c.Label.String = 'LST ( C )';
193 title('LST OLI/TIRS - Bras lia')
194 axis equal
```


APÊNDICE C – Imagens geradas a partir dos valores de LST calculados

Nesse apêndice, estão listadas as imagens geradas com os dados de LST calculados neste trabalho. Vale ressaltar que:

- O horário de aquisição dos dados MODIS/Terra sobre Brasília é aproximadamente 13h15min;
- O horário de aquisição dos dados MODIS/Aqua sobre Brasília é aproximadamente 17h05min;
- O horário de aquisição dos dados OLI/TIRS sobre Brasília é aproximadamente 13h35min.

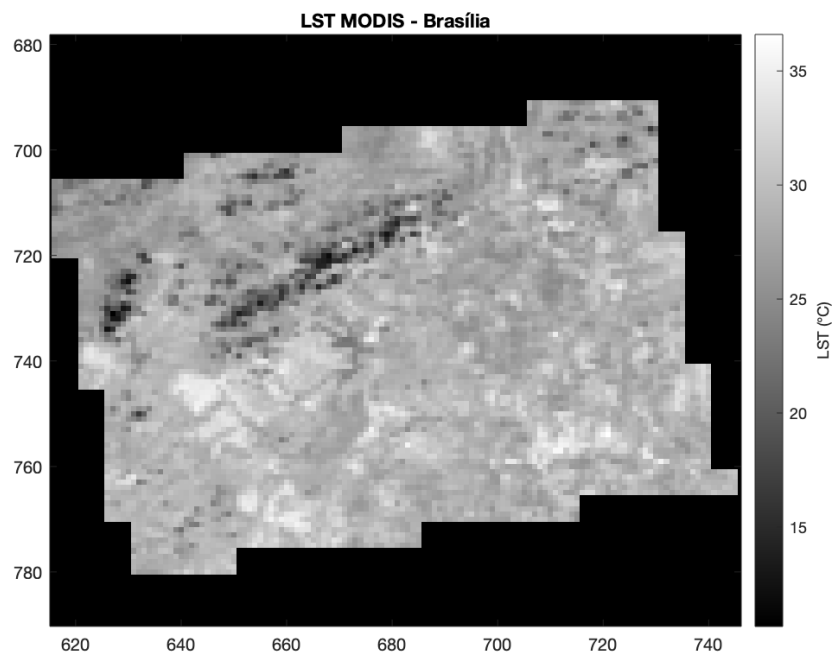


Figura 15 – LST — MODIS/Terra; 29/12/2019.

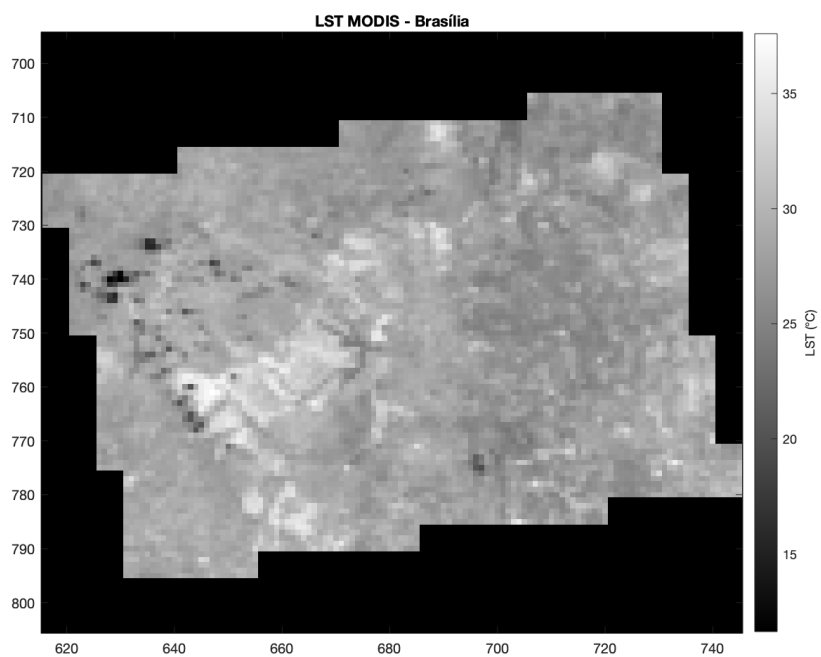


Figura 16 – LST — MODIS/Terra; 14/01/2020.

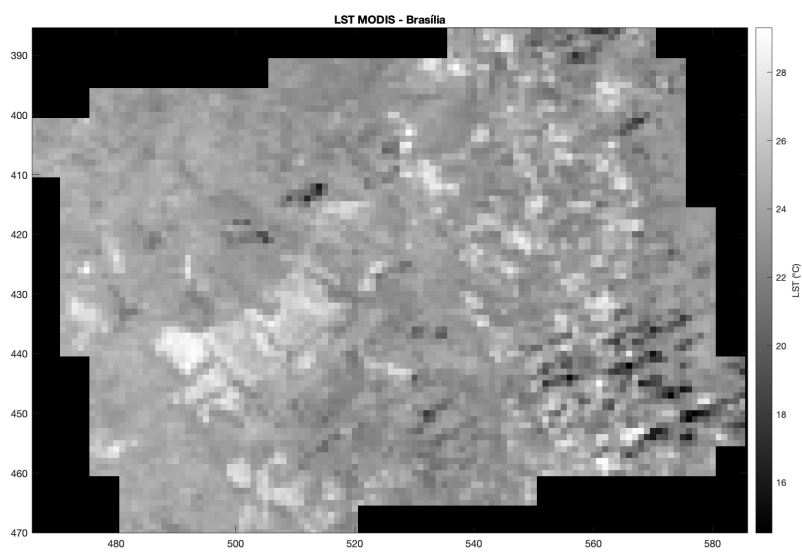


Figura 17 – LST — MODIS/Terra; 28/04/2020.

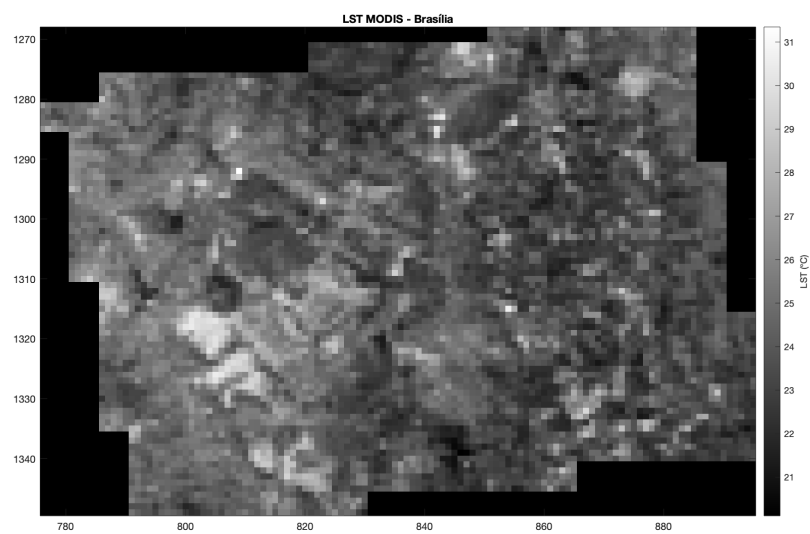


Figura 18 – LST — MODIS/Terra; 28/05/2020.

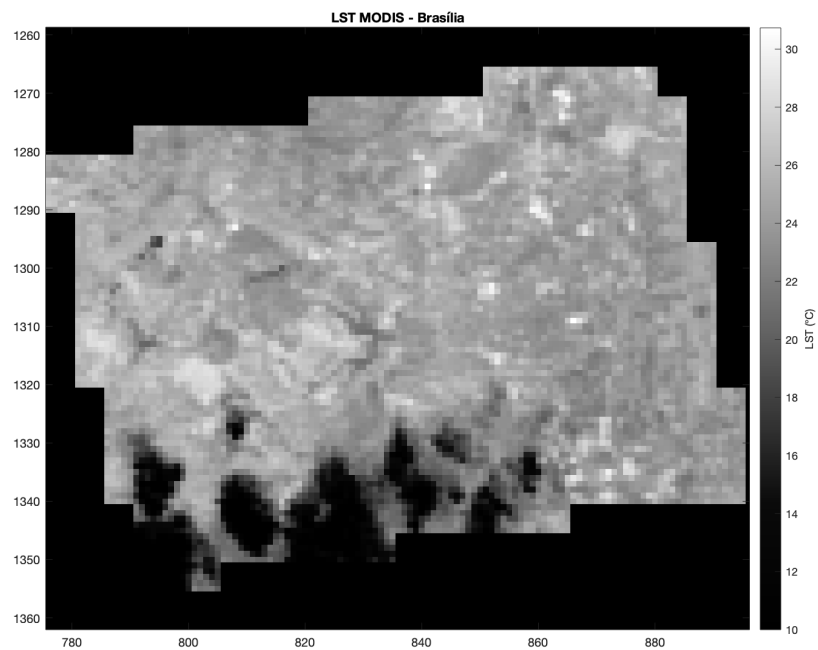


Figura 19 – LST — MODIS/Terra; 13/06/2020.

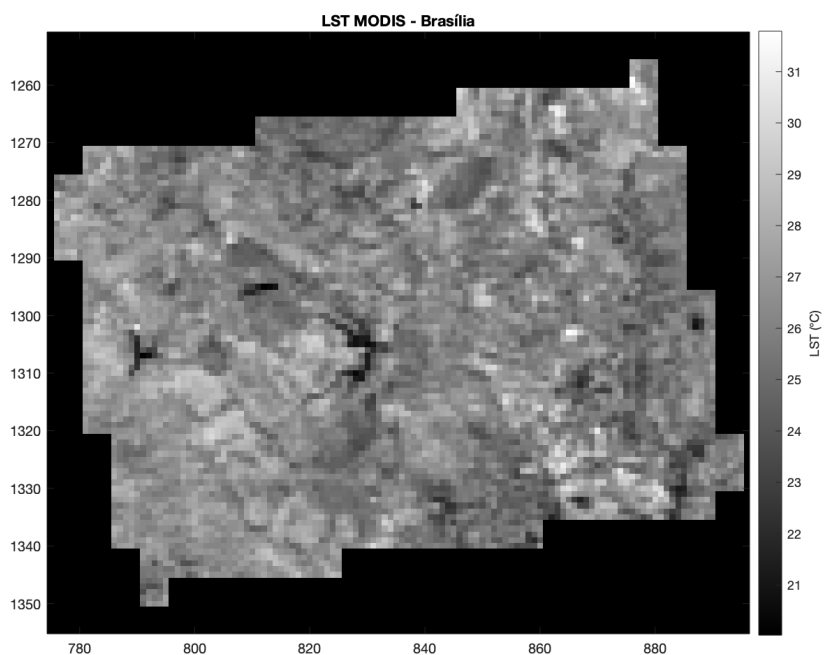


Figura 20 – LST — MODIS/Terra; 15/07/2020.

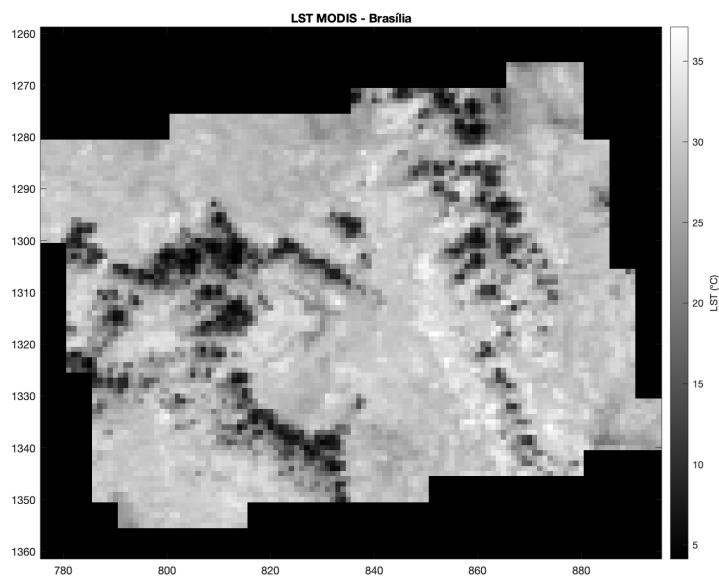


Figura 21 – LST — MODIS/Terra; 16/08/2020.

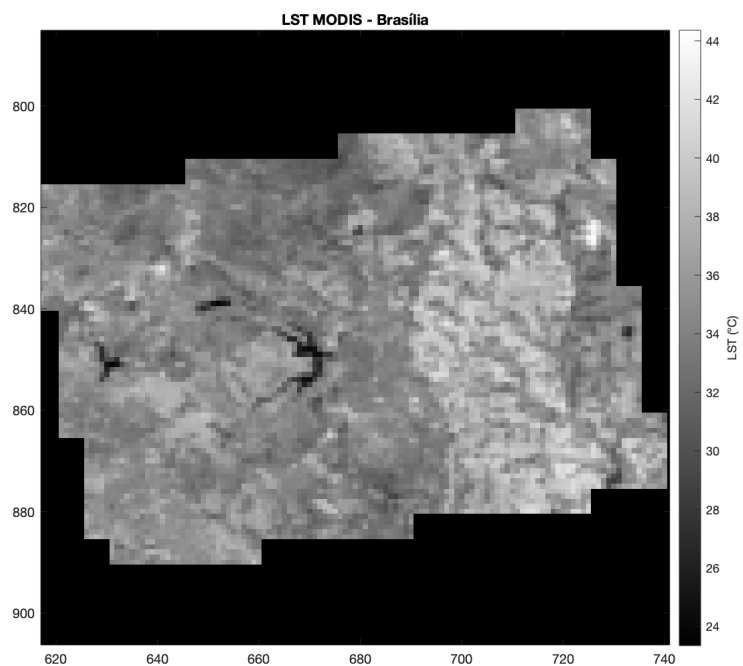


Figura 22 – LST — MODIS/Terra; 26/09/2020.

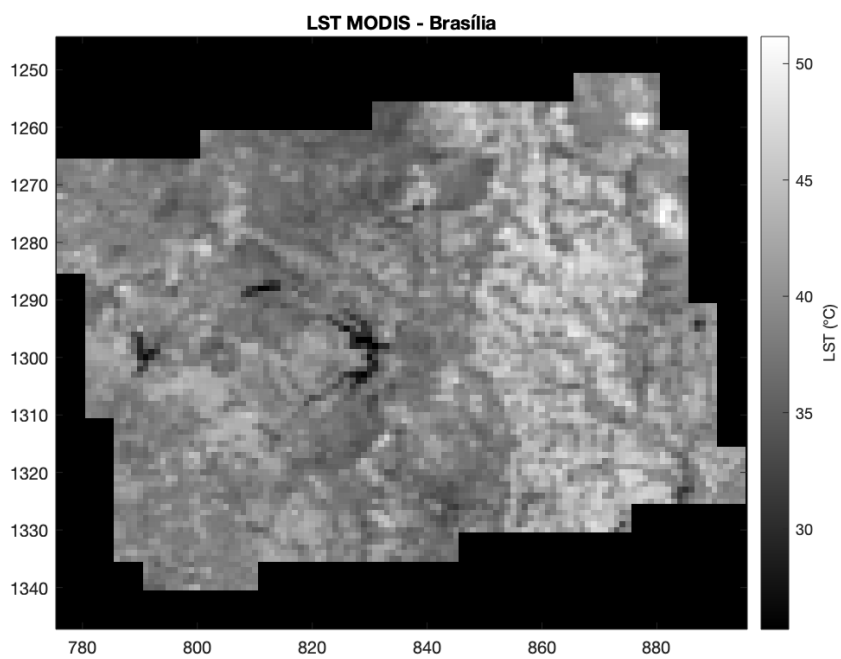


Figura 23 – LST — MODIS/Terra; 03/10/2020.

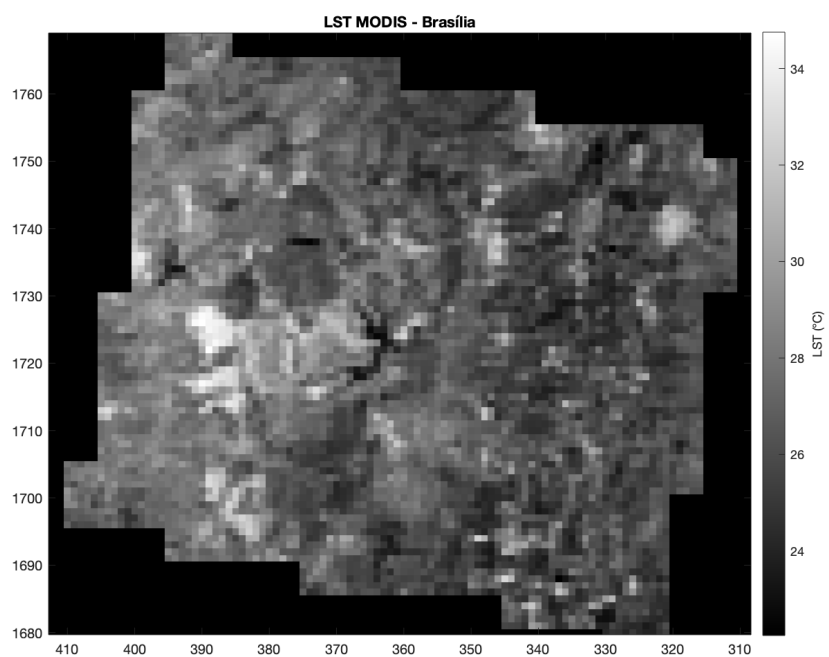


Figura 24 – LST — MODIS/Aqua; 29/05/2020.

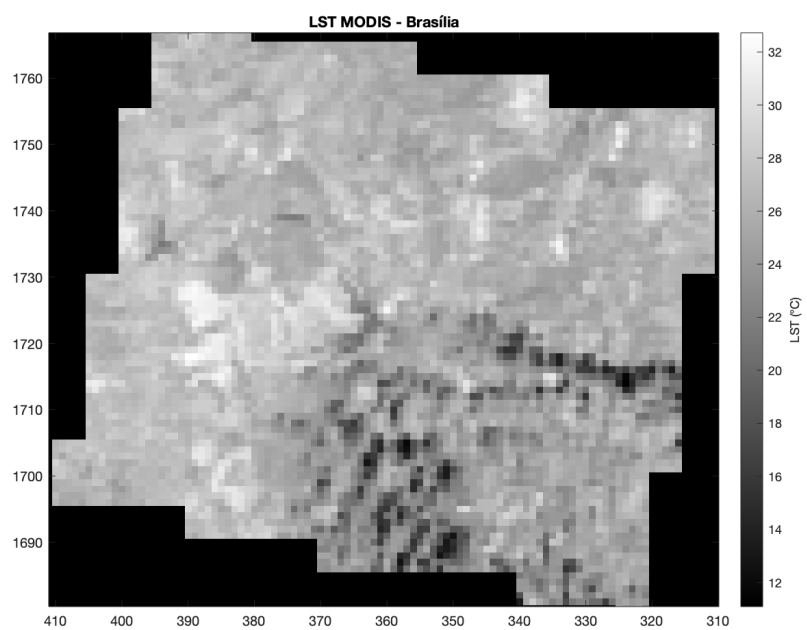


Figura 25 – LST — MODIS/Aqua; 14/06/2020.

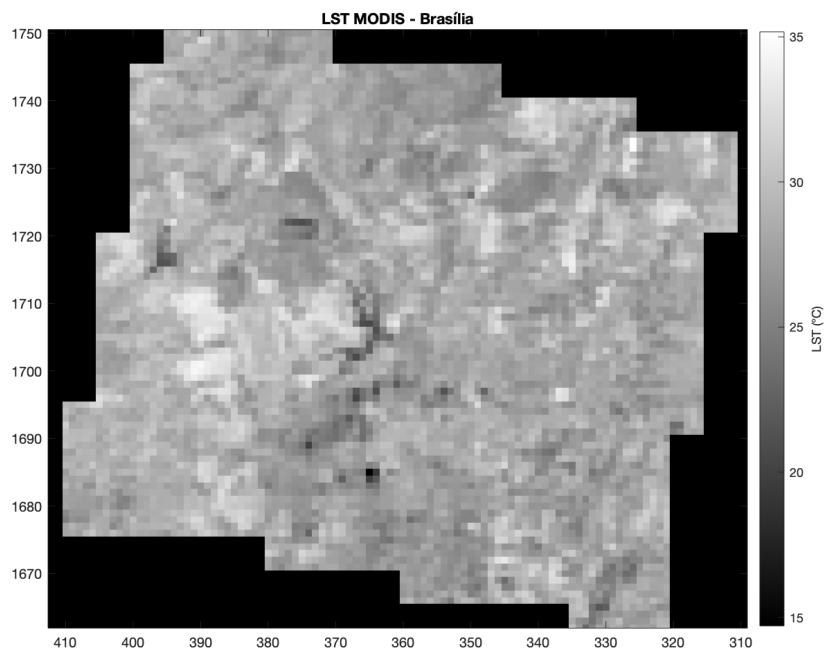


Figura 26 – LST — MODIS/Aqua; 16/07/2020.

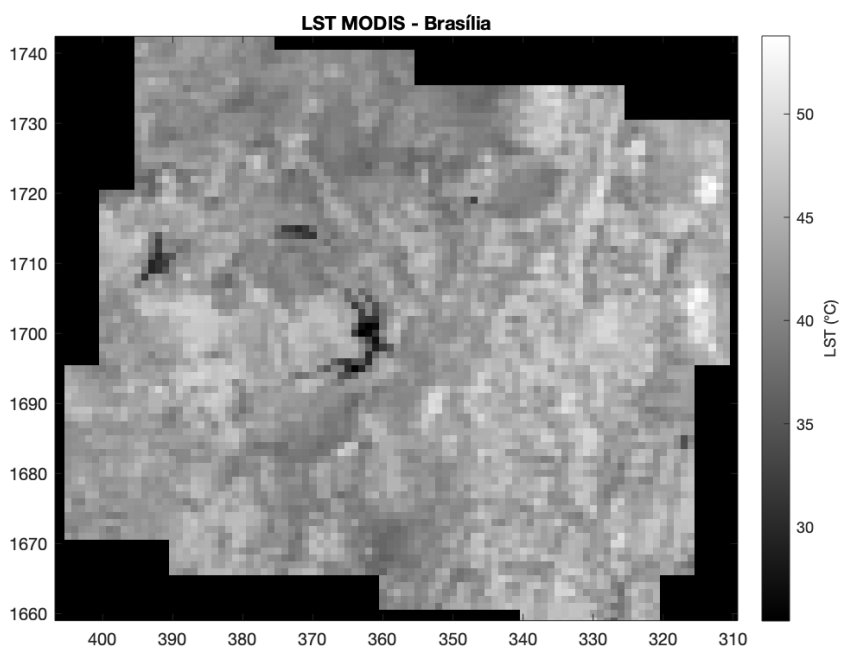


Figura 27 – LST — MODIS/Aqua; 04/10/2020.

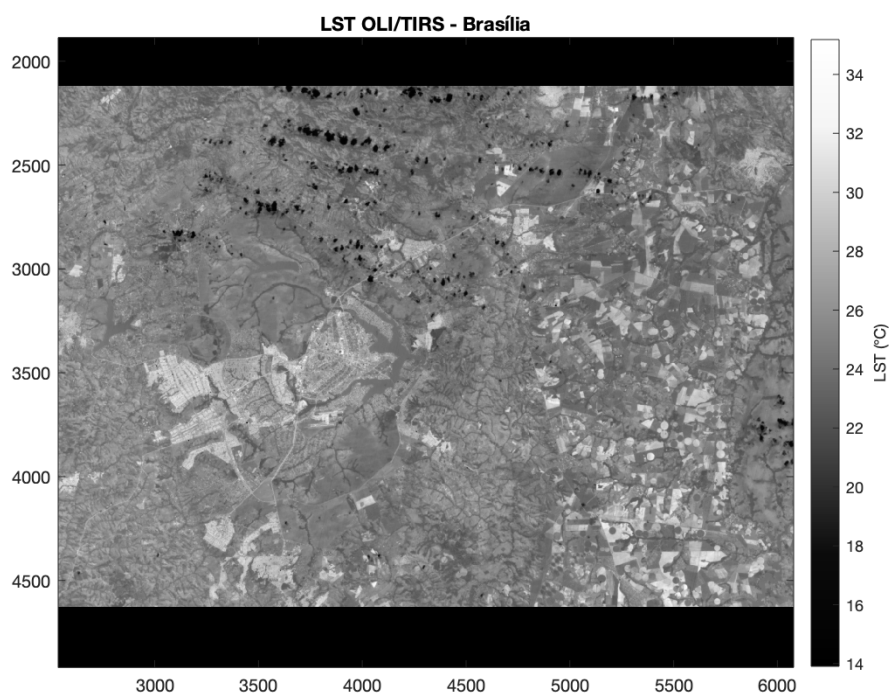


Figura 28 – LST — OLI/TIRS; 27/04/2020.



Figura 29 – LST — OLI/TIRS; 29/05/2020.



Figura 30 – LST — OLI/TIRS; 14/06/2020.

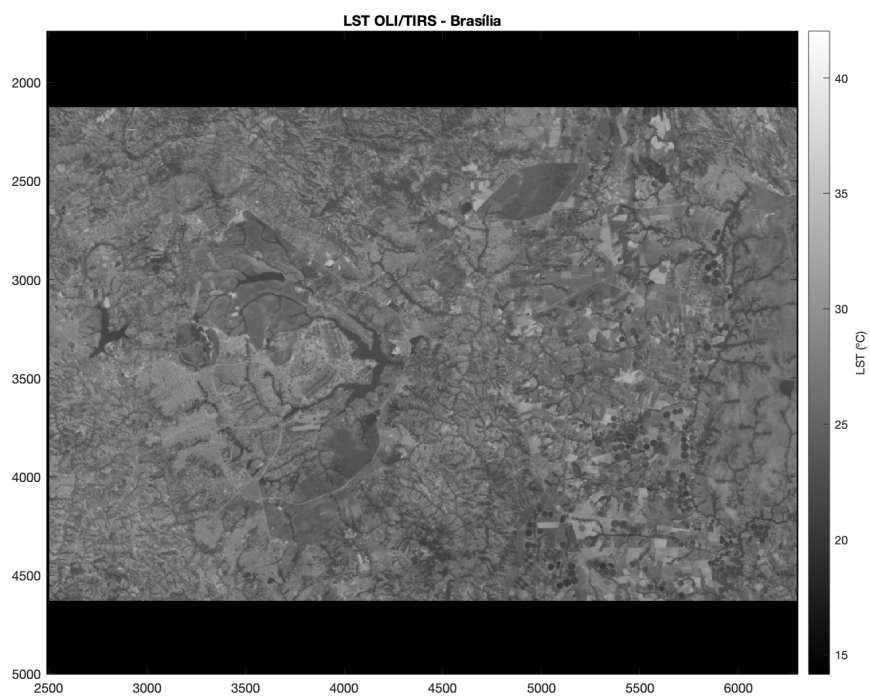


Figura 31 – LST — OLI/TIRS; 16/07/2020.

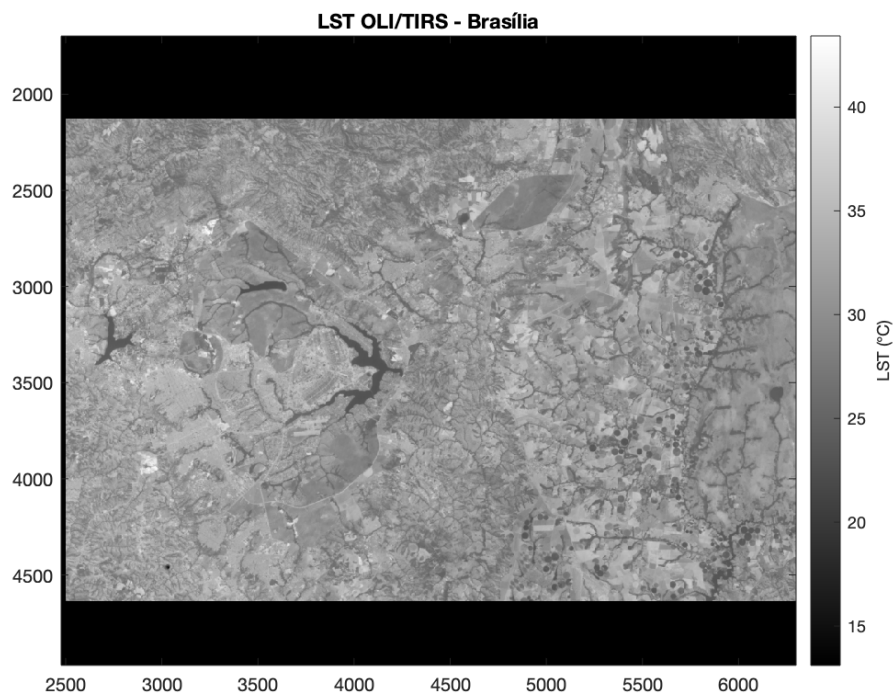


Figura 32 – LST — OLI/TIRS; 17/08/2020.



Figura 33 – LST — OLI/TIRS; 02/09/2020.

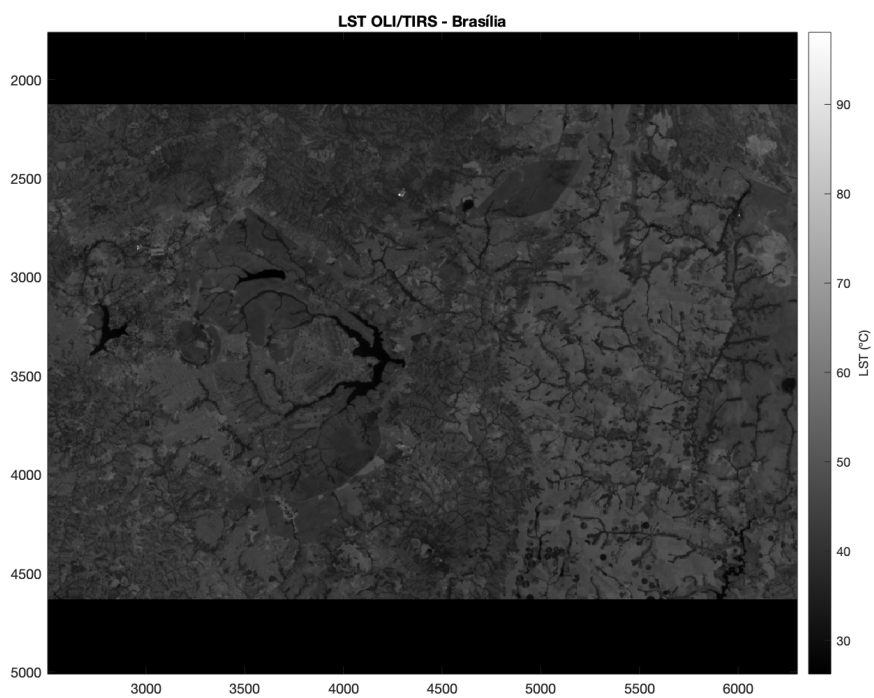


Figura 34 – LST — OLI/TIRS; 04/10/2020.



Figura 35 – LST — OLI/TIRS; 21/11/2020.

Referências

- CÂMARA, G. et al. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & graphics*, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 395–403, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.
- CENGEL, Y. A.; KLEIN, S.; BECKMAN, W. *Heat transfer: a practical approach*. [S.l.]: WBC McGraw-Hill Boston, 1998. v. 141. Citado 5 vezes nas páginas 7, 17, 18, 20 e 21.
- CROSTA, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. [S.l.]: UNICAMP/Instituto de Geociências, 1999. Citado na página 23.
- ENGBRETSON, C. 2017. Disponível em: <<https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-809-Landsat8-Level1DFCB-v11.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- GARTLAND, L. *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2011. Citado na página 15.
- KÄFER, P. S. et al. Comparative analysis of split-window and single-channel algorithms for land surface temperature retrieval of a pseudo-invariant target. *Boletim de Ciências Geodésicas*, SciELO Brasil, v. 26, n. 2, 2020. Citado na página 41.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. *Remote sensing and image interpretation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. Citado na página 22.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. d. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. *Universidade de Brasília, Brasília*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 24.
- MONTANARO, M. et al. Stray light artifacts in imagery from the landsat 8 thermal infrared sensor. *Remote Sensing*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 11, p. 10435–10456, 2014. Citado na página 29.
- REDDY, S. N.; MANIKIAM, B. Land surface temperature retrieval from landsat data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, n. 20, p. 9679–9687, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 31.
- SMITH, R. Computing the planck function. *Professional Paper, Yale University*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- SOBRINO, J.; RAISSOUNI, N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to morocco. *International journal of remote sensing*, Taylor & Francis, v. 21, n. 2, p. 353–366, 2000. Citado na página 31.
- SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from landsat tm 5. *Remote Sensing of environment*, Elsevier, v. 90, n. 4, p. 434–440, 2004. Citado na página 31.
- SOLIMINI, D. *Understanding Earth Observation*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 23.

SPARK, W. *Condições meteorológicas médias de Brasília*. 2020. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com>>. Acesso em: 7 dez. 2020. Citado na página 35.

SURVEY, U. U. G. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 7 dez. 2020. Citado na página 29.

TOLLER, G. N. et al. Modis level 1b product user's guide. *Signature*, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 9, 32 e 33.

VIANNA, E. O. *O Campo Térmico Urbano: Ilhas de Calor em Brasília - DF*. 2018. Citado na página 15.