UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE ILHAS DE CALOR URBANAS POR GEOPROCESSAMENTO NO DISTRITO FEDERAL

FELIPE PARREIRA DE FARIA BORGES

ORIENTADOR: ELEUDO ESTEVES DE ARAÚJO SILVA JÚNIOR, M.Sc.

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: 12/2017.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE ILHAS DE CALOR URBANAS POR GEOPROCESSAMENTO NO DISTRITO FEDERAL

FELIPE PARREIRA DE FARIA BORGES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

_____

ELEUDO ESTEVES DE A. SILVA JÚNIOR, M.Sc, UnB.
ORIENTADOR

_____

CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc., UnB.
EXAMINADOR EXTERNO

_____

HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc., UnB.
EXAMINADOR INTERNO

DATA: BRASÍLIA/DF, 11 de DEZEMBRO de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

BORGES, FELIPE PARREIRA DE FARIA
Análise de Ilhas de Calor Urbanas por Geoprocessamento no Distrito Federal 2017.
ix, 100 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
1. Geoprocessamento 2. Ilhas de Calor
3. SPRING 4. Bandas do Infravermelho
I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BORGES, F.P.F. (2017).Análise de Ilhas de Calor Urbanas por Geoprocessamento. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-005/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Parreira de Faria Borges
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise de Ilhas de Calor Urbanas por Geoprocessamento
GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Felipe Parreira de Faria Borges
SHIN QI 5 Conjunto 7 Casa 11
71505-770 - Brasília/DF - Brasil

RESUMO

A presente monografia apresentada para a disciplina de Projeto Final 2 no curso de Engenharia Civil trata da análise das ilhas de calor urbanas na região do Distrito Federal por meio do processamento digital de imagens obtidas por satélite. São apresentados os conceitos científicos básicos que regem o comportamento da energia eletromagnética emitida pelo Sol e pelos corpos terrestres, bem como conceitos sobre as técnicas de sensoriamento remoto necessárias para a obtenção de imagens de satélite. Os conceitos são apresentados como forma de motivar a pesquisa científica, além de justificar a relevância do tema para a Engenharia Civil. Discute-se ainda a causa das ilhas de calor, derivadas da ocupação do solo tipicamente urbana. A metodologia proposta para a análise é exposta, discorrendo-se ainda sobre os satélites existentes no mercado e suas características, bem como sobre o *software* de geoprocessamento a ser utilizado, que é o SPRING® (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas). Estudaram-se três regiões administrativas do DF: Asa Sul, Taguatinga e Noroeste. As duas primeiras foram comparadas em seu comportamento térmico contrastante, a última foi avaliada em seu índice de vegetação e temperatura ao longo de uma evolução histórica, já que é de urbanização recente. Fizeram-se visitas de campo para se observar a tipologia urbana e confirmar as causas do fenômeno para as três regiões (regiões densamente ocupadas e com pouca vegetação produzindo temperaturas maiores). Por fim, traçaram-se perfis térmicos sobre o DF englobando as regiões acima mencionadas, observando-se, em alguns casos, comportamento tipicamente insular, porém não se constatou relação entre o relevo e a a distribuição de temperaturas.

Sumário

RESUMO **iv**

1 INTRODUÇÃO **1**

2 JUSTIFICATIVA **3**

3 OBJETIVOS **4**
3.1 OBJETIVO GERAL 4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **5**
4.1 SENSORIAMENTO REMOTO (JENSEN, 2011, p. 1-32) 5
4.2 TERMOLOGIA E RADIAÇÃO TERMAL (BAPTISTA, 2012) 14
4.3 BANDAS NA FAIXA DO TERMAL (JENSEN, 2011, p. 251-278) 20
4.4 SATÉLITES QUE FORNECEM IMAGENS GRATUITAS 30
4.4.1 LANDSAT 8 30
4.4.2 CBERS 31
4.4.3 SENTINEL 35

5 MATERIAIS E MÉTODOS **38**
5.1 MATERIAIS 38
5.2 MÉTODOS 39
5.2.1 METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS 39
5.2.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANAS 43

6 RESULTADOS **46**
6.1 QUEIMADAS 46
6.2 AS REGIÕES ADMINISTRATIVAS DO DF 49
6.2.1 ÁGUAS CLARAS 49
6.2.2 BRAZLÂNDIA 50
6.2.3 CANDANGOLÂNDIA 50
6.2.4 CEILÂNDIA 50
6.2.5 CRUZEIRO 51
6.2.6 ESTRUTURAL 51
6.2.7 FERCAL 51
6.2.8 GAMA 51
6.2.9 GUARÁ 52
6.2.10 ITAPOÃ 52

6.2.11 JARDIM BOTÂNICO 52
6.2.12 NÚCLEO BANDEIRANTE 53
6.2.13 LAGO NORTE 53
6.2.14 LAGO SUL 53
6.2.15 PARANOÁ 53
6.2.16 *PARK WAY* 54
6.2.17 PLANALTINA 54
6.2.18 PLANO PILOTO 54
6.2.19 RECANTO DAS EMAS 55
6.2.20 RIACHO FUNDO I E II 55
6.2.21 SAMAMBAIA 55
6.2.22 SANTA MARIA 56
6.2.23 SÃO SEBASTIÃO 56
6.2.24 SIA 56
6.2.25 SOBRADINHO I E II 56
6.2.26 SUDOESTE E OCTOGONAL 57
6.2.27 VARJÃO 57
6.2.28 VICENTE PIRES 57
6.2.29 TAGUATINGA 58
6.3 TEMPERATURA DAS RA's 58
6.4 HISTÓRICO DAS TEMPERATURAS NO DF 68
6.5 O SETOR NOROESTE 78
6.6 RELATÓRIO DE VISITA TÉCNICA OU DE CAMPO 80
6.6.1 ASA SUL 80
6.6.2 TAGUATINGA 82
6.6.3 SETOR NOROESTE 84
6.7 RELEVO E PERFIL DE TEMPERATURA NO DF 86

7 CONCLUSÕES **96**

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS **97**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **99**

Lista de Figuras

1 Refletividade de materiais urbanos (modificado - Baptista, 2003). 2
2 Perfil de temperatura de cidade mono-nucleada (Fonte: site da EPA, conforme citado em Bias, 2003). 3
3 Imagens com diferentes resoluções espaciais (Jensen, 2011). 10
4 Resolução temporal (Jensen, 2011). 10
5 Resolução radiométrica (Jensen, 2011). 11
6 Relações angulares (Jensen, 2011). 12
7 Formas de propagação do calor (Fonte: https://goo.gl/UDZUSQ, com adaptações). 15
8 Curva de emissão de energia eletromagnética de corpo negro (Jensen, 2011). . . 16
9 Reflectância espectral de materiais selecionados (Jensen, 2011). 19
10 Curvas de emitância radiante espectral da água e do quartzo, em comparação a um corpo negro. 19
11 Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético (Jensen, 2011). 22
12 Representação esquemática de aeronave dotada de câmera para sensoriamento remoto (Jensen, 2011). 25
13 Temperatura radiante diária de vários materiais (Jensen, 2011). 29
14 Comparação dos comprimentos de onda para as bandas dos Landsat 8 e 7 (Fonte: https://goo.gl/PbFu4S). 31
15 Sensores dos satélites CBERS 3 e 4 (Fonte: https://goo.gl/XrJ8xb). 35
16 Bandas espectrais do Landsat 8 e do Sentinel 2 (Fonte: https://goo.gl/u5PsPe). . 37
17 Janela do ambiente LEGAL no SPRING® 5.5.0. 40
18 Janela de tabulação cruzada no SPRING® 5.5.0. 41
19 Janela para operações aritméticas no SPRING® 5.5.0. 42
20 Janela para geração de grade retangular no SPRING® 5.5.0. 43
21 Fluxograma da metodologia. 46
22 Carta de temperatura do DF de 25/08/2017. 48
23 Carta de temperatura do DF de 10/09/2017. 49
24 Mapa dos subdistritos do DF. 59
25 Carta de temperatura média por RA do DF em 16/04/2016. 61
26 Carta de temperatura média por RA do DF em 22/08/2016. 63
27 Carta de temperatura média por RA do DF em 21/07/2016. 64
28 Carta de temperatura média por RA do DF em 02/05/2016. 66
29 Carta de temperatura média por RA do DF das médias das imagens de 16/04, 02/05, 21/07, 22/08. 67
30 Carta de temperatura do DF de 26/05/1984. 69
31 Carta de temperatura do DF de 30/05/1997. 70

32 Carta de temperatura do DF de 24/06/2006. 71
33 Carta de temperatura do DF de 16/04/2016. 72
34 Imagens do *Google Earth* de 30/12/2016. 72
35 Carta de uso do solo do DF de 26/05/1984. 73
36 Carta de uso do solo do DF de 30/05/1997. 74
37 Carta de uso do solo do DF de 24/06/2006. 75
38 Carta de uso do solo do DF de 16/04/2016. 76
39 Temperatura média por uso do solo. 77
40 Polígono do setor Noroeste. 78
41 Temperaturas média, mínima e máxima do setor Noroeste. 79
42 NDVI médio do setor Noroeste. 79
43 Superquadra 303 Sul. 81
44 Superquadra 103 Sul. 81
45 Setor Hoteleiro Sul. 82
46 Quadra QNG 27 (Taguatinga Norte). 83
47 Avenida Comercial (Taguatinga Sul). 84
48 Canteiros de obra (Noroeste). 85
49 Quadra 108 do Noroeste. 86
50 Quadra 111 do Noroeste. 86
51 Modelo 3D de temperatura para a imagem de 16/04/2016. 87
52 Modelo 3D de temperatura para a imagem de 02/05/2016. 88
53 Modelo 3D de temperatura para a imagem de 21/07/2016. 89
54 Modelo 3D de temperatura para a imagem de 22/08/2016. 90
55 Visualização 3D do relevo do DF. 91
56 Temperatura sobre relevo para a imagem de 16/04/2016. 91
57 Temperatura sobre relevo para a imagem de 02/05/2016. 92
58 Temperatura sobre relevo para a imagem de 21/07/2016. 92
59 Temperatura sobre relevo para a imagem de 22/08/2016. 93
60 Perfil de temperatura para a imagem de 02/05/2016. 94
61 Perfil de temperatura para a imagem de 21/07/2016. 95

Lista de Tabelas

1 Imagens de satélite do DF utilizadas. 38
2 Dados das imagens do DF para análise de incêndios. 47
3 Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 16/04/2016 do LandSat 8. 60
4 Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 22/08/2016 do LandSat 8. 62
5 Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 21/07/2016 do LandSat 8. 64
6 Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 02/05/2016 do LandSat 8. 65
7 Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF das imagens da data de 16/04, 02/05, 21/07, 22/08 do LandSat 8. 67
8 Dados das imagens de todo o DF. 69
9 Medida de classes do uso do solo para a imagem de 26/05/1984 74
10 Medida de classes do uso do solo para a imagem de 30/05/1997. 74
11 Medida de classes do uso do solo para a imagem de 24/06/2006. 75
12 Medida de classes do uso do solo para a imagem de 16/04/2016. 76

Lista de Símbolos

	Significado	**Dimensão**
A	constante da lei de Wien	$[L\theta]$
A_L	fator aditivo de ajuste da radiância	$[MLT^{-2}]$
β	campo de visada instantâneo	
B_{term}	emitância da banda térmica	
D	dimensão das células de resolução	$[L]$
ε	emissividade	
θ	ângulo de visada	
gsw	largura de imageamento	$[L]$
H	altitude de voo	$[L]$
I	intensidade radiante	
ε_λ	emissividade para o comprimento de onda λ	
K_1	constante de calibração do sensor	$[MLT^{-2}]$
K_2	constante de calibração do sensor	$[MLT^{-2}]$
λ	comprimento de onda (eletromagnética)	$[L]$
λ_m	comprimento de onda para máxima emissão de energia radiante	$[L]$
L_{term}	radiância espectral termal	$[MLT^{-2}]$
M_b	exitância de corpo negro	$[MT^{-3}]$
M_L	parâmetro de ajuste da radiância	$[MLT^{-2}]$
M_r	exitância de corpo real	$[MT^{-3}]$
$NDVI$	índice de vegetação por diferença normalizada	
NIR	reflectância do infravermelho próximo	
R	reflectância do vermelho	
ρ_λ	reflectância para o comprimento de onda λ	
σ	constante de Stephan-Boltzmann	$[MT^{-3}\theta^{-4}]$
T	temperatura absoluta	$[\theta]$
T_{kin}	temperatura (absoluta) cinética	$[\theta]$
T_{rad}	temperatura (absoluta) radiométrica	$[\theta]$

1 INTRODUÇÃO

Desde a segunda metade do século XX, o Brasil vem passando por um processo de urbanização mais intenso, em que grandes volumes de famílias se deslocam do campo para as cidades de forma muitas vezes desordenada. Esse processo tem contribuído, junto com o crescimento vegetativo da população urbana para uma expansão um tanto caótica das áreas urbanas brasileiras.

Esse processo de dispersão da ocupação urbana tem causado efeitos adversos não só no âmbito social, mas também na qualidade ambiental (que influi diretamente na qualidade de vida) das cidades. Um desses efeitos é o fenômeno das assim chamadas *ilhas de calor urbanas*.

Esse fenômeno consiste no aumento de temperatura nos centros urbanos, principalmente nas regiões mais densamente ocupadas e povoadas das cidades, em relação às áreas mais afastadas do centro, próximas ao entorno. Isso ocorre pois os materiais utilizados na construção civil são capazes de armazenar calor, principalmente ao evitar a reflexão de radiação infravermelha; ainda as áreas mais povoadas e menos arborizadas naturalmente apresentam temperatura elevada, devido à concentração humana e outras fatores geradores de calor, como as indústrias, os veículos a combustão e as residências, mesmo durante a noite, segundo Bias, 2003.

As ilhas de calor são percebidas em ambientes urbanos devido aos diferentes padrões de refletividade dos vários materiais . Refletividade é a razão entre a energia eletromagnética refletida por um objeto ou material e a energia eletromagnética total incidente nele. A energia que não é refletida tende a ser absorvida pelo material (quando não é transmitida através do mesmo). A energia absorvida é, então, reemitida na forma de ondas com maior comprimento de onda. Assim, bons refletores são maus absorvedores e, por conseguinte, maus emissores, sendo que o contrário também é válido . Nas cidades, a maior parte dos materiais são tipicamente maus refletores, o que os faz absorver a radiação solar e reemiti-la na forma de ondas curtas de infravermelho, cujo comprimento de onda é maior que a radiação visível . Desse modo, a temperatura apresenta maiores valores nos centros urbanos do que nas regiões do entorno.

Contribui ainda para o fenômeno o fato de as edificações urbanas serem formadas por materiais com baixa condutibilidade térmica, terem cores escuras (*i.e.* que são más refletoras) e terem elevados gabaritos, o que dificulta a dispersão da energia térmica. A Figura 1 mostra os principais materiais utilizados em centros urbanos e sua refletividade.

Observa-se ainda uma redução da capacidade natural de evapotranspiração, devido às menores áreas verdes, aos sistemas subterrâneos e canalizados de condução de águas pluviais ou da própria canalização de rios e outros cursos d'água, e ao emprego de materiais com baixa porosidade, como o asfalto e o concreto.

Já nas regiões com menor alteração da vegetação nativa, observa-se uma grande capacidade de se refletir o infravermelho. De fato, se os olhos humanos pudessem perceber radi-

Figura 1: Refletividade de materiais urbanos (modificado - Baptista, 2003).

ação na faixa do infravermelho, as plantas não seriam vistas em cor verde mas em "tonalidade"infravermelha, pois elas refletem mais esta faixa de comprimento de onda do que aquela. A presença de água nas plantas e em corpos hídricos também é relevante para o fenômeno, pois sabe-se que a água, apesar de ter um comportamento próximo do de um corpo negro, possui um grande calor específico, o que propicia uma significativa inércia térmica para o ambiente.

Assim, o modelo clássico de ilha de calor baseia-se em uma cidade, em que há um grande adensamento - com muitas vias asfaltadas e edifícios altos - em um centro comercial, sendo envolvido em forma de anel por regiões residenciais com menor densidade superficial de edificações e maior quantidade de árvores em um setor residencial urbano, seguido por outra região em anel mais arborizada e dispersa de um setor residencial suburbano, até se chegar por fim à área rural propriamente dita. Essa cidade típica é dita *mono-nucleada*, e possui uma distribuição espacial da temperatura crescente à medida que se aproxima do centro comercial, decrescendo à medida que se aproxima da área rural, de modo que a distribuição de temperatura é aproximadamente radialmente simétrica em relação ao centro comercial. A Figura 2 ilustra esse tipo de cidade.

As cidades modernas, porém, tem apresentado um comportamento diferente pois são *poli-nucleadas*. Isso significa que há vários centros urbanos dispersos em todo o município, de modo que não existe uma simetria radial em toda a cidade, apesar de haver uma certa simetria, em menor escala, para cada núcleo em si. Esse é o caso do Distrito Federal e, mais especificamente, de Brasília. Contudo, como os núcleos muitas vezes estão próximos uns dos outros, as ilhas de calor tendem a se fundir umas com as outras, eliminando o *efeito oásis* causado por uma área vegetada entre dois centros, a qual muitas vezes nem sequer existe.

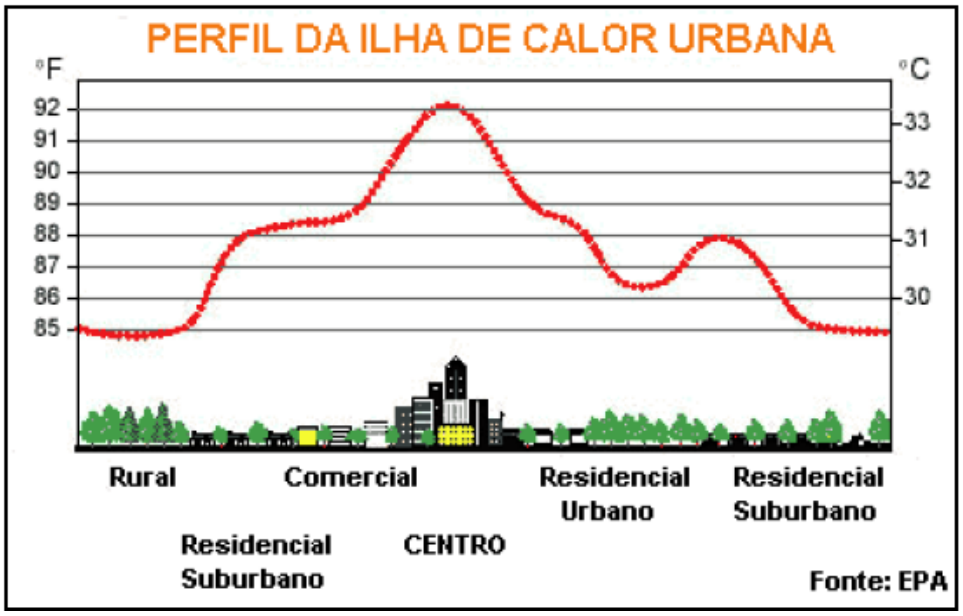


Figura 2: Perfil de temperatura de cidade mono-nucleada (Fonte: site da EPA, conforme citado em Bias, 2003).

As ilhas de calor estão presentes em vários centros urbanos, e fazem-se notar em especial no Distrito Federal (DF). Mesmo que a região de Brasília, que inclui as Asas Norte e Sul, tenha sido planejada, o crescimento de outras regiões administrativas do DF, bem como das cidades do seu entorno, o que foi crescente desde a inauguração da cidades no início da década de 1960, tem intensificado esse fenômeno.

Como comprovação clara da formação de ilhas de calor no DF, pode-se citar o caso da Estrutural, que é a maior invasão dessa unidade federativa. Entre 1884 (quando era uma região desabitada) e 2002, a temperatura média variou de 18^oC para 28^oC.

2 JUSTIFICATIVA

As ilhas de calor são, portanto, uma fenômeno urbano de grande importância para a determinação da qualidade de vida de uma população, além de representar a sua formação histórica de ocupação e uso do solo. As ilhas de calor são função direta da configuração urbana e paisagística e são identificáveis por meio de satélites. Seu estudo ajuda a compreender melhor certos fenômenos físicos e sua relação com fenômenos sociais e naturais.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho de monografia no curso de Engenharia Civil tem como propósito analisar por meio do processamento de imagens obtidas por satélites informações a respeito da temperatura da superfície de determinadas áreas do Distrito Federal e suas correlações com o uso e ocupação do solo, permitindo a identificação de materiais e coberturas da superfície capazes de intensificar a concentração de regiões urbanas com elevadas temperaturas se comparadas às regiões não urbanas (com vegetação natural) - fenômeno conhecido como ilhas de calor urbanas -, bem como a distribuição espacial do fenômeno, estudando-se ainda outros fenômenos naturais relacionados ao mesmo, para que se possa melhor compreendê-lo e explicá-lo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como meios para se atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

• analisar o comportamento de duas regiões urbanas do Distrito Federal: uma com alta densidade demográfica (no caso, Taguatinga) cuja ocupação não foi completamente planejada e que apresenta urbanização deficiente, e outra que tenha ocupação planejada e densidade demográfica menor, com melhores equipamentos urbanos (no caso, a Asa Sul);

• analisar a temperatura média dessas duas regiões ao longo do tempo, comparando-as entre si mesmas e uma com a outra;

• escolher uma região com urbanização recente (no caso, o setor Noroeste), de modo que se possa analisar a temperatura da mesma antes, durante e depois do processo de urbanização;

• avaliar a relação entre o uso do solo e a temperatura média ao longo do tempo, principalmente no que diz respeito à presença de vegetação, medida por um índice de vegetação adequado;

• observar a distribuição espacial das ilhas de calor no DF como um todo, e também analisar o perfil de temperatura nas regiões estudadas, e

• relacionar a presença das ilhas de calor com o relevo do DF e das regiões específicas estudadas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 SENSORIAMENTO REMOTO (JENSEN, 2011, p. 1-32)

A ciência testa teorias e modelos como válidos ou úteis na descrição de fenômenos naturais, precisa de dados empíricos e medições, os quais são colhidos de experimentos feitos em laboratório ou do próprio ambiente. Quando os dados são colhidos diretamente do ambiente, a coleta é chamada de coleta *in situ* ou *in loco*. Porém, nem sempre é possível fazer esse tipo de coleta, quando, então, se torna necessário a obtenção de dados à distância, processo conhecido como *sensoriamento remoto do ambiente*.

As coletas de dados *in situ* podem produzir erros significativos nas medidas, pelos seguintes motivos: a) a interferência do cientista que coleta os dados e do equipamento utilizado na coleta sobre o meio ambiente ou o fenômeno estudado, o que produz dados enviesados; b) o uso de procedimentos de coleta de dados enviesados (*e.g.* seleção de amostra não representativa do universo amostral, uso impróprio e sistemático de uma parte do equipamento), e c) erro na calibração do equipamento. Desse modo, os dados - como temperatura e umidade - sobre a superfície terrestre obtidos *in situ* não podem ser considerados dados reais ou representativos das propriedades e fenômenos que ocorrem em uma ampla região na Terra, sendo contados apenas como dados pontuais de referência.

A tecnologia tem permitido ao homem coletar dados de um objeto ou área geográfica utilizando equipamentos de sensoriamento remoto. Inicialmente, o sensoriamento era realizado ao se acoplar em aves e, depois, em aeronaves suborbitais câmeras fotográficas, sendo desde, então, esse procedimento associado à fotogrametria (técnica para obter medidas confiáveis por meio da fotografia) e à interpretação fotográfica. A Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto definiu formalmente o *sensoriamento remoto* como "a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de algum objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou o fenômeno em estudo"(JENSEN, 2011, p. 3).

Com o passar do tempo, porém, o sensoriamento remoto começou a se distanciar da fotogrametria, uma vez que começaram a ser de interesse o estudo de imagens obtidas remotamente que representassem faixas de comprimento de onda fora do espectro visível (como o infravermelho termal), e os conceitos acabaram por se tornarem mais distintos. Isso ocorreu, sobretudo, devido à crescente importância da fotointerpretação ocasionada pela Segunda Guerra Mundial.

Embora os estudiosos da área ainda divirjam sobre a definição de sensoriamento remoto, em geral tem-se limitado o conceito ao registro de informações das regiões de quase todo o espectro eletromagnético (visível, ultravioleta, infravermelho e micro-ondas) por sensores (*e.g.* câmeras, lasers, escâneres, *etc*) sem contato com o objeto estudado e podendo estar em plataformas móveis como aeronaves e satélites, bem como a análise visual ou por processamento digital

dessas informações. Será nesse último sentido que o termo *sensoriamento remoto* será utilizado a partir de agora neste texto.

Primeiro, deve-se entender quais tipos de informação um sensor consegue obter de uma determinada área ou de um certo objeto. Os sensores aqui tratados são capazes de descrever um objeto geometricamente, em seu formato e tamanho, informando ainda sobre a extensão de um determinado fenômeno em uma área geográfica. São ainda capazes de aferir a quantidade de energia eletromagnética que o objeto ou a área emitem ou refletem, o que permite obter dados sobre uma propriedade real do objeto não diretamente medida. A intensidade de energia eletromagnética recebida pelo sensor pode ser convertida em dados sobre essa outra propriedade por meio de técnicas de processamento digital de imagens ou técnicas de análise visual.

Assim, de acordo com a definição de sensoriamento remoto adotada, os sensores são dispositivos capazes de registrar os diferentes níveis de intensidade de radiação eletromagnética (REM), que são ondas eletromagnéticas, as quais se propagam com velocidade igual à da luz no vácuo ($c \approx 3 \cdot 10^8\ m/s$), diretamente até o sensor ou por reflexão ou rerradiação para o sensor. Como a velocidade da luz é a maior que existe na natureza, a REM proporciona uma alta eficiência na monitoração de fenômenos e objetos localizados a grandes distâncias do sensor. Assim também, variações na intensidade ou propriedades - como comprimento de onda - da REM são indicativos de mudanças nas características nos fenômenos ou objetos estudados, como a temperatura, por exemplo.

A princípio, boa parte das técnicas de sensoriamento remoto foram desenvolvidas para fins de estudos astronômicos, uma vez que ordinariamente é muito oneroso (senão impossível) coletar dados *in situ* de corpos celestes. Portanto, se os sensores de REM conseguem captar informação da Lua, do Sol e de outros planetas e estrelas, certamente não haverá problemas em se obter imagens de qualquer região da superfície terrestre.

As técnicas e os sensores utilizados em sensoriamento remoto, porém, podem ainda ser empregados na coleta de dados de objetos próximos, como é o caso de microscópios eletrônicos, aparelhos de raio-X, máquinas fotográficas, sensores de infravermelho e tomógrafos, muitos dos quais são usados cotidianamente por pessoas comuns, médicos, dentistas, arqueólogos e outros cientistas. Portanto, a tecnologia do sensoriamento remoto não se limita ao estudo de fenômenos geográficos e geológicos de grande escala.

O sensores remotos podem ser ainda classificados de acordo o critério de atividade ou passividade. Sensores ativos são aqueles que emitem radiação eletromagnética sobre o meio e, posteriormente, captam a resposta espectral (reflexão) e emissão do ambiente ou objeto estudado. Um exemplo simples disso seria uma câmera fotográfica dotada de *flash*, que é um dispositivo que ilumina o ambiente antes de capturar a imagem, de modo que se vejam as cores verdadeiras de cada objeto com maior intensidade. Outros exemplos seriam o radar e o sonar - este último não sendo um sensor eletromagnético. Como interferem ativamente no objeto de estudo, os sensores ativos não possuem a vantagem inicialmente atribuída ao sensoriamento remoto, que é não interferir no objeto ou fenômeno estudado.

O outro tipo de sensor é o passivo, que representa boa parte dos sensores presentes em satélites, o qual simplesmente capta a energia eletromagnética emitida/refletida por um objeto ou região *in natura*.

Esse último tipo de sensor tem vantagens especiais sobre o anterior, pelo fato de ser não invasivo. Assim, ele não altera as propriedades (ou a manifestação delas na emissão de REM) daquilo que se estuda, sendo um sensor superior àqueles de coleta *in situ*, quando esses interferem no objeto cujas propriedades se quer medir.

Outra vantagem dos sensores remotos é o fato de que eles podem ser programados para captar imagens e coletar dados sistematicamente, o que facilita a remoção de viés da amostragem, que é comum nas coletas de dados *in situ*.

Além dessas, outra vantagem do sensoriamento remoto consiste em conseguir levantar informações dos mais variados tipos para outras ciências, as quais usarão essas informações em suas investigações. Ainda, esses dados podem ser obtidos para imensas áreas geográficas, ao invés de simplesmente pequenas observações pontuais. Esses dados permitem a modelagem de processos bio-físico-químicos e de fenômenos sociais e culturais, tais como crescimento populacional, urbanização e êxodo rural.

Todavia, cabe lembrar que mesmo o sensoriamento remoto tem as suas imperfeições. Além do problema dos sensores ativos, os sensores eletromagnéticos podem ficar descalibrados, causando erros sistemáticos nas medidas obtidas em laboratório ou *in situ*. Os dados podem ser muito caros de serem obtidos, ou - o que é mais comum - muito onerosos de serem interpretados; sua interpretação, por mais que os dados sejam fieis à realidade, pode ser duvidosa, dando margem à mais de uma conclusão sobre as causas de um certo fenômeno.

Uma vez que se tem uma imagem obtida por sensoriamento remoto, cabe aos estudiosos e interessados na área saber transformar esse registro de energia eletromagnética em uma informação que seja útil no aperfeiçoamento de um modelo físico, que busca representar a realidade de maneira simplificada para fins tecnológicos, ou na obtenção de um dado relevante em uma análise que já pressupõe um modelo científico mais ou menos elaborado. Esse *processo de sensoriamento remoto* segue algumas etapas, que serão brevemente explicadas a seguir.

O primeiro procedimento no uso de informações obtidas por sensoriamento remoto é elaboração do enunciado de um problema, que seria o primeiro passo do método científico, o qual é baseado em dois tipos de raciocínio lógico: o dedutivo, no qual se parte de premissas abstratas, gerais e universais, chegando-se a conclusões concretas e específicas, e o indutivo, no qual se parte do de casos específicos e busca-se a obtenção de uma regra geral. Os dois tipos de raciocínio podem ser utilizados em uma mesma análise de um problema físico.

Os dois modelos de lógica ainda podem se subdividir conforme o seu processamento em modelos determinísticos, em que, dadas as condições iniciais de um sistema, o seu estado futuro é certo, ou estocástico, em que os resultado final, a partir de certas condições, é apenas provável, havendo mais de uma possibilidade de resultado. O modelo determinístico, por sua vez, pode

ainda ser fundamentado na experiência, no conhecimento prévio ou no processo físico em si.

Alguns cientistas, porém, apresentam uma abordagem que não faz uso do raciocínio lógico indutivo nem dedutivo, mas apenas extrai informações a partir de imagens por processos tecnológicos, o que pode gerar novos conhecimentos, apesar de prescindir de rigor formal.

Para se completar a formulação do problema científico estudado, devem-se ainda levantar hipóteses a fim de explicar o problema. Essas hipóteses serão, posteriormente, confirmadas ou refutadas como explicação aceita de um fenômeno, de acordo com os resultados empíricos e a sua conveniência na formulação de modelos simples e abrangentes.

Uma vez que o problema foi estabelecido, procede-se à segunda fase do método científico aplicado ao sensoriamento remoto: a coleta de dados. Quando uma hipótese é formulada, identificam-se múltiplas variáveis ou observações que podem ser investigadas. Desse modo, podem-se usar investigações *in situ* ou ainda técnicas de sensoriamento remoto para obter informações sobre a maioria das variáveis relevantes.

As observações *in situ* tem como função: a) calibrar os dados obtidos por um sensor remoto, e b) realizar uma avaliação não enviesada da precisão de resultados finais. Os dados obtidos em campo são também relacionados diretamente com o sistema de coordenadas espaciais associado ao sistema de posicionamento global (GPS), havendo necessidade de se corrigir as medições dessas coordenadas. Alguns dos dados medidos são também obtidos em laboratório, por conveniência.

Além dos dados das variáveis principais, há os chamados dados colaterais, que auxiliam na interpretação e análise das medições dos dados principais. Exemplos desses tipos de dados são modelos numéricos (ou digitais) de terreno, mapas geológicos, mapas pedológicos, estatísticas de concentração populacional, *etc*. Usualmente, esses dados são representados e armazenados em um Sistema de Informação Geográfica, SIG.

Os últimos dados a serem obtidos são os dados captados por técnicas de sensoriamento remoto, com equipamentos analógicos, que guardam informações puramente visuais de imagens, ou digitais, que representam imagens como matrizes (sendo os mais utilizados atualmente), e equipamentos passivos ou ativos.

Podem ser medidas variáveis biofísicas e híbridas. Variáveis biofísicas são aquelas que estão relacionadas às ciências físicas ou às biológicas; e informações sobre essas variáveis podem ser obtidas diretamente sem a necessidade de dados substitutos ou auxiliares. São exemplos de variáveis biofísicas - obtidas pela análise de faixas específicas do espectro eletromagnético - a temperatura superficial, a quantidade de vapor de água atmosférico, ou o teor de umidade do solo.

Já as variáveis híbridas são aquelas criadas pela análise sistemática de mais de uma variável biofísica. O estresse da vegetação, por exemplo, é obtido pela análise conjunta de absorção devido à clorofila, temperatura e teor de umidade das folhas. Assim, há uma grande variedade de variáveis híbridas que podem ser obtidas, sendo elas, portanto, inumeráveis. Contudo, cabe

ressaltar que a cobertura do solo, uma variável extremamente importante para cientistas físicos e sociais, é uma variável híbrida dependente de várias outras variáveis biofísicas.

A mais importante dessas características é a resolução. O termo resolução indica, a princípio, a nitidez ou precisão visual que uma certa imagem possui. Porém, apenas esse conceito não é suficientemente objetivo para fins de sensoriamento remoto. Portanto, classifica-se a resolução em vários tipos.

O primeiro tipo de resolução a ser considerado é a resolução espectral, que indica o número ou tamanho de intervalos de comprimentos de onda eletromagnética específicos (também chamados de bandas ou canais) aos quais um determinado instrumento de sensoriamento remoto é sensível. Quanto menos bandas um sensor captar e quanto mais estreitas as bandas forem, maior é a resolução espectral de um instrumento sensor. Isso ocorre, pois um sensor capaz de captar vários comprimentos de onda não fornecerá com precisão a intensidade emitida ou refletida de um comprimento de onda específico, mas sim uma média de vários comprimentos.

Por esse motivo, os sistemas de sensoriamento remoto são multi-espectrais, ou seja registram a radiação eletromagnética em várias bandas distintas, indo do infravermelho termal às regiões do visível no espectro eletromagnético. Além disso, a largura nominal de cada banda tende a não ser excessiva - em geral, na faixa de centenas de nanômetros - de modo a manter uma boa resolução espectral.

Os sensores comuns, porém, não possuem bandas que cobrem todo o espectro eletromagnético, de modo que há alguns saltos em valores de comprimento de onda, produzindo faixas "cegas"no espectro percebido. Há, entretanto, os instrumentos hiper-espectrais, que possuem centenas de bandas espectrais, e os ultra-espectrais, que agrupa muitas centenas de bandas espectrais.

A quantidade e o tipo de bandas utilizadas tem importância não só para multiplicar as informações de emissão e reflexão eletromagnética, mas também a sua escolha permite identificar parâmetros biofísicos de interesse. Uma boa escolha de bandas para se captar são aquelas que fornecem um contraste entre o objeto que se quer observar e o seu substrato, de sorte que a informação desejada seja facilmente identificada.

O segundo tipo de resolução a ser considerado é a resolução espacial, a qual é uma medida da menor distância angular ou linear que permite distinguir dois objetos na imagem obtida. A resolução espacial é dada pelo tamanho do lado do *pixel* - elemento da imagem, considerado quadrado. Essa resolução é maior quanto menor for o lado do *pixel*, estando relacionada aos objetos que desejam ser imageados e suas respectivas escalas; objetos menores exigem maior resolução espacial para serem nítidos em uma imagem, pois a resolução espacial é a menor distância real entre dois pontos que permite que os mesmos sejam distinguidos em uma imagem. A Figura 3 mostra uma mesma imagem, tirada com diferentes tamanhos de *pixel* indicados na figura, de uma área residencial próximo a Mechanicsville, Nova Iorque, obtida em 1^o de junho de 1998, ilustrando o conceito de resolução espacial.

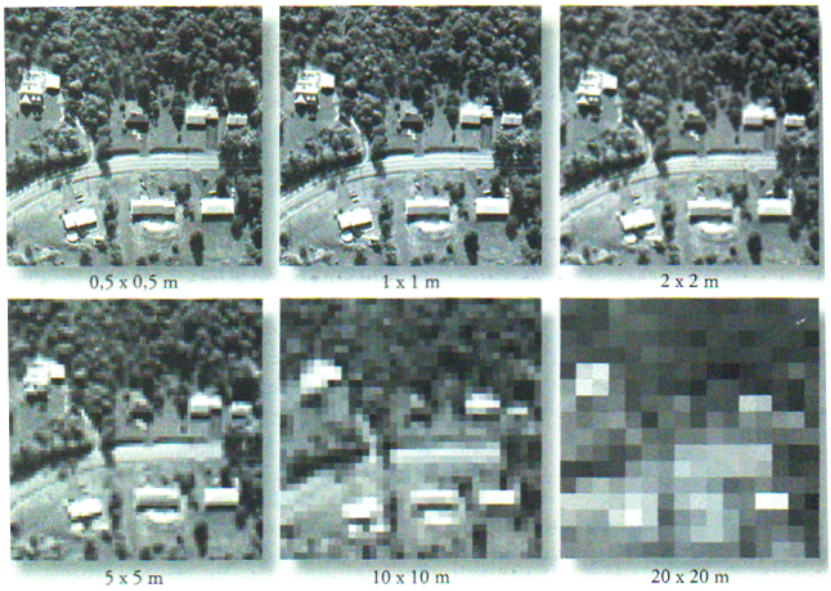


Figura 3: Imagens com diferentes resoluções espaciais (Jensen, 2011).

Na prática, considera-se que a resolução espacial nominal necessária para se detectar um determinado objeto seria equivalente a, pelo menos, metade da menor dimensão do menor exemplar da classe de objetos que se quer detectar, como se observa na Figura 3, a partir de uma noção intuitiva dos tamanhos dos componentes da área residencial. Isso, todavia, não exclui a necessidade de haver um contraste na resposta espectral do objeto e de seu substrato.

Uma imagem obtida por sensoriamento remoto é um registro instantâneo de uma parte da superfície terrestre, quando, por exemplo, lida-se com imagens de satélite ou aerofotogrametria. A resolução temporal relaciona-se à frequência com que se obtém a imagem de uma determinada área: quanto maior for a frequência, ou menor for o período, maior é a resolução temporal. Obter imagens espaçadas temporalmente de uma mesma região permite identificar e analisar processos em desenvolvimento, bem como fornece dados para se fazer uma previsão. A Figura 4 mostra de maneira esquemática a resolução temporal, como o período entre a aquisição de duas imagens de uma mesma região.

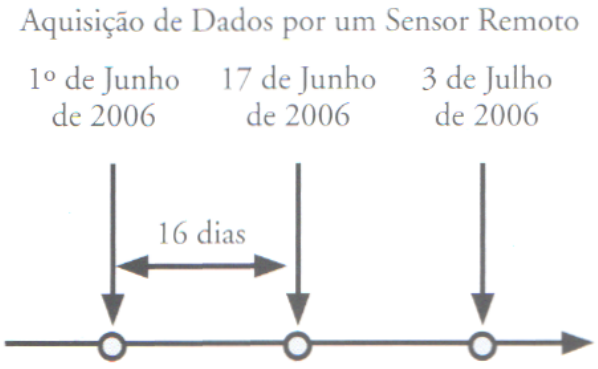


Figura 4: Resolução temporal (Jensen, 2011).

A qualidade de cada tipo de resolução exigida, em geral, é balanceada pelas necessidades científicas de modo a não tornar o sensoriamento remoto anti-econômico. Desse modo, a alta resolução temporal - exigida para monitoramento de certos fenômenos meteorológicos, por exemplo - vem combinada com uma pequena necessidade de boa resolução espacial. Já o estudo de fenômenos mais lentos, o que requer baixa resolução temporal, como a evolução do uso e ocupação do solo em uma cidade, exige alta resolução espacial. Algumas poucas aplicações exigem níveis altos e/ou moderados de resolução espacial **e** temporal.

Outra maneira de lidar com diferentes respostas temporais é a emissão de um pulso único por sensores ativos, e a captação de diversas respostas espectrais. A diferença no tempo entre as respostas do pulso permite identificar as feições da superfície terrestre bem como a altura de certas estruturas, sendo os pulsos de curta duração os melhores na determinação precisa de distâncias.

O quarto tipo de resolução é a resolução radiométrica, que é a precisão na capacidade de distinguir entre diferentes intensidades de respostas espectrais de um mesmo comprimento ou faixas de comprimento de onda refletido, emitido ou retro-espalhado. Ela é medida como a quantidade de níveis de cinza percebida pelo sensor, que é dada por 2^n, sendo n o número de bits da imagem. Uma alta resolução radiométrica garante uma maior facilidade na percepção de objetos e fenômenos nas imagens de sensoriamento remoto. A Figura 5 representa esquematicamente a resolução radiométrica e o número de níveis de cinza e bits de várias imagens.

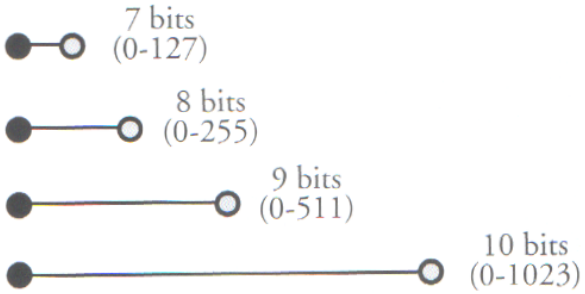


Figura 5: Resolução radiométrica (Jensen, 2011).

Nos equipamentos de sensoriamento remoto, é possível polarizar a luz com filtros polarizadores com o fim de captar a resposta espectral da luz que se propaga em diferentes ângulos, além de emitir e receber, em sensores ativos, luz em uma única direção.

Além do ângulo de incidência da luz, outras duas informações angulares são importantes para o sensoriamento remoto. A primeira delas é o ângulo zenital, que é o ângulo formado entre o sensor ou o Sol, e o zênite, que é o eixo/direção perpendicular ao solo que aponta para cima da superfície terrestre. O outro ângulo importante é o azimute, que é o ângulo entre a projeção do sensor ou do Sol na superfície terrestre, e a direção do Norte, contado a partir do Norte em sentido horário. A Figura 6 ilustra os ângulos mencionados.

Quanto aos tipos de sistemas de sensoriamento remoto, os suborbitais são aqueles em que se

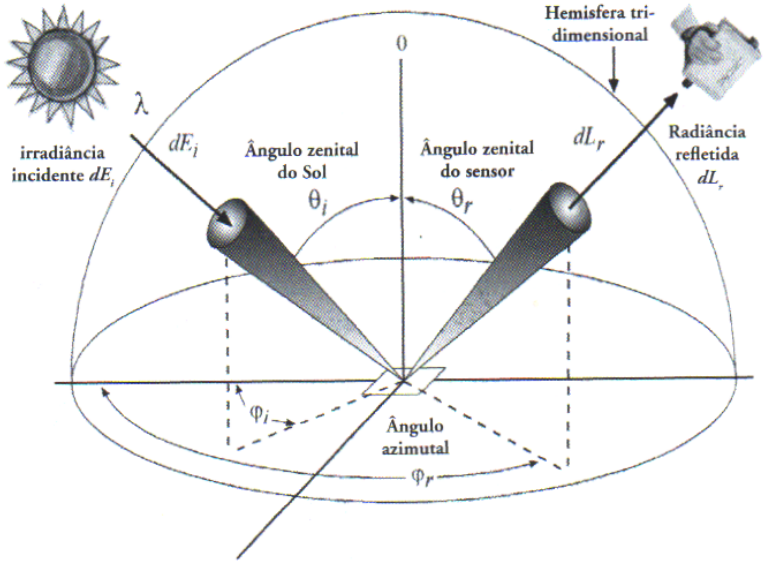


Figura 6: Relações angulares (Jensen, 2011).

acopla um sensor a alguma aeronave. Esse foi o primeiro sistema a ser desenvolvido e ainda é largamente utilizado para fornecer dados em alta resolução espaciais e espectrais, sendo empregados para vários fins, inclusive monitoramento de desastres ambientais, como derramamentos de petróleo ou enchentes. A desvantagem desse sistema, porém, é o seu alto custo operacional por unidade de superfície coberta em suas imagens. Esse custo tem sido reduzido, contudo, atualmente com o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados.

O outro tipo de sistema de sensoriamento remoto é o orbital, que é feito por meio de satélites, os quais, além de fornecerem dados de alta qualidade e resolução, possuem um baixo custo por unidade de área coberta. Alguns satélites conseguem obter imagens mesmo através das nuvens, e podem cobrir toda a superfície terrestre em um período de algumas semanas. Isso permite mapear ecossistemas e países inteiros, possibilitando monitorar o desenvolvimento de fenômenos de maneira consistente e sinóptica.

As técnicas utilizadas se resumem ao processamento analógico (ou visual) de imagens e ao processamento digital, os quais buscam identificar fenômenos, medi-los e usar as informações obtidas na solução de problemas.

O processamento visual ou analógico de imagens está limitado pela capacidade humana de analisar características sutis. O homem é capaz de analisar em uma imagem os seguintes aspectos: tons de cinza, cor, altura e profundidade, tamanho, forma, textura, padrão, sombra, local, associação e arranjo, sendo essas propriedades naturalmente distinguidas na vida cotidiana em imagens comuns de revistas e livros. Foram criadas várias técnicas de análise visual de imagens, muitas das quais ainda são empregadas atualmente mesmo para imagens obtidas por satélites modernos.

Contudo, para certos fins, a análise visual é insuficiente, sendo preciso empregar ferramentas computacionais capazes de realizar cálculos matriciais extensos. A análise digital de imagens

passa por vários processos, a saber: o pré-processamento (que inclui correções radiométricas e geométricas), o realce de imagens, o reconhecimento de padrões por estatística inferencial, o processamento fotogramétrico por imagens estereoscópicas, o uso de árvores de decisão, análise por redes neurais, análise de dados hiper-espectrais e detecção de mudanças.

A correção radiométrica visa a corrigir ruídos ou erros na imagem que tenham origem em falhas do próprio sensor ou fenômenos naturais. Corrigir essa informação espectral defeituosa é essencial para se poder aproveitar os dados sãos obtidos na imagem, assim como compará-los com os dados de outras imagens.

A correção geométrica, por sua vez, busca associar os elementos de imagens individuais a uma posição planimétrica em uma projeção cartográfica padronizada, o que facilita o uso de outras informações geográficas e espaciais.

Já o realce de imagens objetiva facilitar a percepção de detalhes em imagens por uma ampliação do contraste visual, para que possam ser facilmente identificados por um analista humano. O realce pode ser feito em componentes de alta ou baixa frequência, em bordas ou até texturas. O realce pode assumir a forma de transformações lineares ou não lineares, para facilitar a identificação de informações relacionadas a fenômenos físicos.

A fotogrametria é empregada com o fim de analisar dados estereoscópicos, permitindo a extração de modelos digitais de terreno e ortofotografias corrigidas diferencialmente por fotografias aéreas ou imagens trianguladas.

Outro processo de análise de imagens é a classificação. Essa classificação pode ser rígida, quando se tem classes discretas e mutuamente exclusivas, ou nebulosa, quando se extraem as proporções dos materiais em cada *pixel*. A classificação pode ainda ser feita baseada em *pixels* isolados uns dos outros, ou por regiões, quando previamente deve-se usar um algoritmo para segmentar a imagem, o que deve considerar não só a resposta espectral do *pixel* isoladamente mas também dos seus vizinhos, e sua posição na imagem.

As técnicas de classificação podem ser de vários tipos. Um destes é o uso de árvores de decisão. Essa técnica não usa estatísticas inferenciais sobre as imagens, mas as classifica com base em regras. Essas regras podem ser criadas *a priori* por especialistas em análise de imagens, indiretamente pela extração de variáveis e usando métodos cognitivos, ou empiricamente por dados observados ou métodos de indução automática. Outra técnica seria o uso de redes neurais, por meio das quais os computadores derivam regras a partir de exemplos fornecidos por especialistas humanos.

Já a análise de dados hiper-espectrais utiliza *softwares* especiais, que reduzem o número de bandas dos dados a um número gerenciável, retendo a essência dos dados. Certos desses programas de computador podem comparar as curvas de reflectância espectral com uma biblioteca de curvas, o que permite a especialistas identificar o tipo e a proporção de distintos materiais contidos em uma imagem.

A obtenção de imagens em várias datas permite ainda o tipo e a distribuição de mudanças

na superfície terrestre. O conhecimento sobre as mudanças na paisagem fornece informação sobre os processos atuais, por meio de algoritmos, que podem ser orientados a cada *pixel* ou a polígonos obtidos por processos de segmentação. Ainda não há um método universal para a classificação e detecção de mudanças, mas os métodos existentes tem sido aperfeiçoados por cientistas de várias áreas.

Uma vez processados, os dados obtidos por sensoriamento remoto precisam ser apresentados de maneira amigável e de fácil leitura e reconhecimento. Essa apresentação da informação é feita por meio de imagens realçadas, mapas-imagem, orto-fotomapas, mapas temáticos, arquivos especiais em bancos de dados, estatísticas ou gráficos. Apresentar a informação dessa maneira requer o uso de estatística, cartografia e sistemas de informação geográficas, além de conhecimentos de outras ciências relacionadas ao fenômeno estudado. É necessário ainda identificar os erros que podem ter sido introduzidos por essas técnicas e corrigi-los, a fim de fornecer informações mais precisas. Tudo isso visa a comunicar os dados de maneira compreensível a leigos e a outros cientistas de outras áreas que não estejam familiarizados com as técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens.

4.2 TERMOLOGIA E RADIAÇÃO TERMAL (BAPTISTA, 2012)

Os corpos materiais com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação eletromagnética de várias faixas de comprimento de onda, entre as quais se incluem a faixa do infravermelho termal. O zero absoluto é um estado em que os átomos e moléculas que compõem um determinado corpo material estão imóveis em termos vibracionais; acima dessa temperatura, as colisões entre as moléculas altera o seu estado de energia, fazendo-as emitir radiação eletromagnética.

Essa radiação termal emitida por objetos naturais ou artificiais pode ser medida, de modo a se obter uma imagem termal dos mesmos. Essa radiação termal, que é formada por ondas eletromagnéticas, tem comprimento de onda que varia de 5,0 μm a 1,0 mm. Contudo, como a atmosfera da Terra não é transparente à radiação de todos os comprimentos de onda, apenas a faixa de 8,0 a 14 μm é utilizada para o sensoriamento remoto terrestre.

Os objetos na superfície da Terra são energizados pela radiação eletromagnética emitida pelo Sol, que, em geral, se concentra na faixa de comprimento de ondas visíveis ao ser humano. Essa radiação, que pode ser concebida como partículas discretas de energia (os fótons), é absorvida por diversos materiais, os quais são excitados e, no seu retorno ao nível energético original, reemitem a energia absorvida sob a forma de ondas longas, *i.e.* com grande comprimento de onda, que constituem ondas na faixa do infravermelho termal.

Dessa maneira, pode-se notar que objetos que absorvem mais radiação eletromagnética visível proveniente dos raios solares, como os objetos de cores mais escuras e menos reflexivos, adquirem temperatura maior do que aqueles de cores mais claras e superfície mais polida/especular, após serem expostos à luz natural.

A temperatura cinética ou verdadeira (também chamada simplesmente de "temperatura") é a medida do grau de agitação ou movimentação das partículas (átomos e moléculas) de um determinado objeto. Esse conceito se diferencia de calor, que é definido como a energia transferida entre dois corpos por diferença de temperatura entre eles.

O calor flui espontaneamente do corpo com temperatura maior para o de temperatura menor, de modo a se atingir o equilíbrio térmico depois da transferência de energia térmica. Além disso, a energia térmica, que é o que é transferido entre dois corpos pelo mecanismo do calor, depende, em um corpo, não só de sua temperatura, mas também de sua massa e do(s) material(is) que forma(m) o objeto.

Há três maneiras de o calor se transferir de um corpo mais quente para outro mais frio, a saber: condução, convecção e (ir)radiação. Os dois primeiros ocorrem somente em meios materiais: o primeiro pelo contato de partículas sólidas cuja posição relativa é constante no tempo, e o segundo em meios fluidos (líquidos e gasosos), em que o fluido aquecido ascende por ter menor massa específica, afastando-se da fonte de calor, e o fluido mais frio desce, por ter maior densidade, aproximando-se da fonte de calor. A terceira forma acontece pela propagação de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer no vácuo também e entre objetos muito distantes entre si, dada a elevada velocidade da luz. É por esse último mecanismo que a radiação solar atravessa o espaço, onde não há matéria, e chega até a superfície terrestre, aquecendo-a. A Figura 7 ilustra os três tipos de propagação do calor.

Figura 7: Formas de propagação do calor (Fonte: https://goo.gl/UDZUSQ, com adaptações).

Quando se estuda o processamento de imagens térmicas, o efeito do calor que mais interessa é o aumento de temperatura do corpo, pois a resposta espectral de cada corpo depende da temperatura em que o mesmo se encontra.

Para compreender melhor esse conceito, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) [1] desenvolveu o conceito de corpo negro. Assim, corpo negro é o corpo ideal que absorve e reemite sob a forma de calor toda radiação eletromagnética incidente nele. Embora não haja naturalmente um corpo que se comporte perfeitamente como corpo negro, um protótipo de

[1] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Leis_de_Kirchhoff, acesso em 28/03/2017.

corpo negro pode ser fabricado como uma esfera oca, negra por fora e com superfície interior metálica/refletora, havendo apenas um único e pequeno orifício comunicando os dois lados da esfera. A superfície negra absorve radiação eletromagnética, e o pequeno orifício dificulta a saída de qualquer raio luminoso - o que o faz atingir o equilíbrio térmico com o corpo.

Cada corpo negro, então, emitirá radiação eletromagnética em uma ampla faixa de comprimentos de onda. Pode-se plotar um gráfico da energia espectral radiante de um corpo negro pelo comprimento de onda de acordo com a sua temperatura, como se observa na Figura 8.

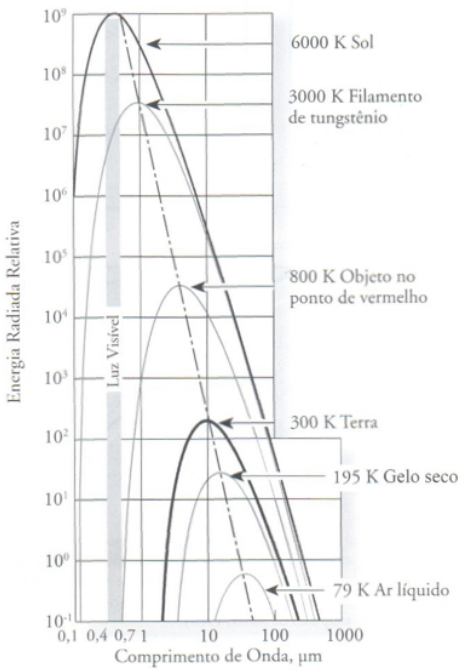


Figura 8: Curva de emissão de energia eletromagnética de corpo negro (Jensen, 2011).

Nota-se que a quantidade de energia emitida é maior para maiores valores de temperatura absoluta do corpo negro; percebe-se ainda que, quanto maior a temperatura do corpo negro, menor será o comprimento de onda no qual a curva atinge o seu pico. Esse comportamento é matematizado pela lei de deslocamento de Wien [2], dada pela Equação 4.1.

$$\lambda_m = \frac{A}{T} \tag{4.1}$$

onde,

λ_m é o comprimento de onda para a qual há a máxima emissão (dada em μm);

A é uma constante igual a $2898\ \mu m\ K$ e

T é a temperatura absoluta do corpo negro (dada em K).

Essa lei explica, por exemplo, a emissão espectral da Terra e do Sol, considerados aproximadamente como corpos negros. A Terra, cuja temperatura média da superfície é da ordem

[2] Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864–1928), físico alemão. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Wien, acesso em: 28/03/2017.

de 300 K (*circa* 27^oC), emite ondas eletromagnéticas com comprimento ao redor de 9,6 μm - variando de 8 a 35 μm, no total, sendo o efetivo de 8 a 14 μm, pois a atmosfera é opaca à radiação com comprimento acima de 14 μm -, enquanto o Sol - cuja fotosfera está a cerca de 5800 K [3]- emite ondas com comprimento entre 0,4 e 2,5 μm.

Assim, as ondas longas emitidas pela Terra estão, em boa parte, na faixa do infravermelho termal, enquanto as ondas curtas emitidas pelo Sol, estão no espectro visível em sua maior parte. Por isso, a obtenção de imagens da superfície terrestre deve utilizar sensores que captem ondas de 8 a 14 μm, tanto quando se usam aeronaves, quanto em satélites, atentando-se para o fato de que os últimos tem dificuldade de captar ondas com comprimento em torno de 9,5 μm devido à absorção da atmosfera (que é mais espessa a nível orbital) nessa faixa.

De modo semelhante à lei de Wien, a lei de Stephan[4]-Boltzmann [5] relaciona o fluxo de energia superficial do corpo negro com a sua temperatura, confirmando a noção intuitiva de que corpos mais quentes emitem mais energia para o ambiente do que corpos mais frios, e de que corpos no zero absoluto não emitem radiação eletromagnética. A lei, dada pela Equação 4.2, equivale à área sob a curva do gráfico da Figura 8. O interessante (porém inesperado) é que a relação entre temperatura e fluxo de energia não é linear, de modo que a quantidade de energia emitida cresce muito mais rápido do que a temperatura.

$$M = \sigma \cdot T^4 \tag{4.2}$$

onde,

M é a exitância radiante da superfície do material (dada em $W \cdot m^{-2}$);

σ é a constante de Stephan-Boltzmann ($5,6697 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) e

T é a temperatura absoluta do corpo negro (dada em K).

Desse modo, o fato de a superfície da Terra ter uma temperatura média equivalentemente constante permite identificar anomalias pela resposta espectral de certas imagens. Incêndios e emissões de magma, por exemplo, são capazes de emitir mais energia eletromagnética e em comprimentos de onda mais curtos, devido a suas elevadas temperaturas. No caso de incêndios, que facilmente atingem 800 K, o pico de emissão está em 3,62 μm de comprimento de onda.

Embora o modelo de corpo negro seja uma boa aproximação de alguns corpos reais, a maioria dos objetos não se comporta dessa maneira, *i.e.* emitindo toda a energia eletromagnética que sobre ele incide. Em geral, o que ocorre é que a maioria dos corpos radia de maneira seletiva no que diz respeito à faixa de comprimento de onda e emitem apenas uma parcela da energia de um corpo negro à mesma temperatura.

Para quantificar essa característica dos corpos reais, criou-se o conceito de emissividade,

[3]Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Sun, acesso em 28/03/2017.

[4]Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), físico austríaco. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_-Boltzmann, acesso em 28/07/2017.

[5]Josef Stephan (1835–1893), físico esloveno. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Josef_Stefan, acesso em 28/07/2017.

representada pela letra grega ε, que é a relação entre a radiância emitida pelo corpo real (M_r) e a radiância emitida por um corpo negro à mesma temperatura (M_b), conforme é dado pela Equação 4.3.

$$\varepsilon = \frac{M_r}{M_b} \tag{4.3}$$

Sabe-se que um objeto pode apresentar diferente emissividade dependendo de sua cor, composição química, umidade, rugosidade da superfície, *etc*. No que diz respeito à faixa do infravermelho no espectro eletromagnético, as emissividades dos objetos são bem próximas de suas absortâncias (fração entre a energia absorvida por um corpo e o total de energia incidente nele), de modo que bons absorvedores são bons emissores, e vice-versa. Assim, objetos de coloração mais escura são maus refletores e bons absorvedores, e, assim, bons emissores, tendo emissão superior na faixa termal do espectro quando comparados a objetos de cor mais clara.

Considerando que a emissividade é igual à absortância para um determinado corpo e que não há transmissão de radiação termal, deduz-se que a intensidade radiante (I) de um determinado corpo, para um comprimento de onda λ é dado pela Equação 4.4.

$$I = \rho_\lambda + \varepsilon_\lambda \tag{4.4}$$

onde,

ρ_λ é a reflectância [6] do corpo para um determinado comprimento de onda λ e

ε_λ é a emissividade do corpo para um determinado comprimento de onda λ.

Considerando uma intensidade radiante constante para um determinado corpo, se o mesmo possui elevada emissividade, a reflectância será pequena, e vice-versa. Isso ocorre com os corpos de água em imagens de satélite, nas quais aparecem lagos e rios em cores escuras, em imagens de bandas na faixa do visível, mas em tom claro nas bandas do infravermelho, uma vez que a água absorve quase toda a energia infravermelha, refletindo muito pouco, de sorte que sua emissividade é quase unitária. Superfícies metálicas, ao contrário, apresentam grande reflectância e baixa emissividade, apresentado cor clara em bandas na faixa do visível. As diferenças de reflectância espectral de alguns materiais pode ser vista na Figura 9.

Tais propriedades podem ser úteis na determinação dos tipos de minerais presentes em determinadas regiões pela análise de imagens de satélite ou outra técnica de sensoriamento remoto, uma vez que diferentes compostos químicos conferem distintos valores de emissividade. Desse modo, uma comparação entre imagens na faixa do visível e imagens na faixa termal são suficientes para se ter uma boa indicação da composição química dos materiais de uma região.

Deve-se considerar ainda que nem sempre os materiais estão isolados na natureza, e que a maneira mais simples de se reduzir a refletividade (ou albedo) de um objeto é umidificando-o.

A água em um objeto aumenta sua capacidade de absorver e, posteriormente, reemitir ener-

[6] Reflectância é a razão entre a energia refletida por um corpo e o total de energia incidente sobre o mesmo.

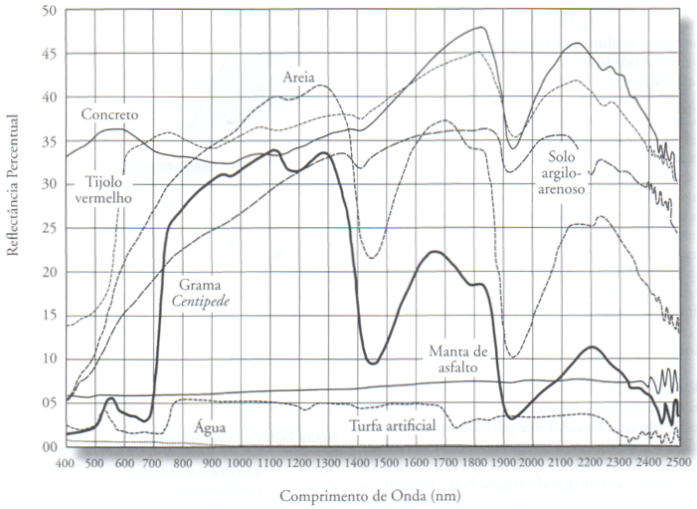


Figura 9: Reflectância espectral de materiais selecionados (Jensen, 2011).

gia eletromagnética. Assim, solos saturados ($\varepsilon = 0,95$ a $0,98$) possuem emissividade próxima da da água ($\varepsilon = 0,92$ a $0,98$), e maior que a de solos secos -$\varepsilon = 0,92$ a $0,94$ -.

Desse modo, pode-se concluir que a emissividade da água (principalmente, água destilada) é bem próxima do valor de um corpo negro, apresentando uma curva de emissividade que segue intimamente a curva do corpo negro. Outros materiais abundantes na superfície terrestre, como o quartzo, por exemplo, irradiam seletivamente de acordo com o comprimento da onda considerada, o que facilita a sua detecção em imagens termais. Uma comparação da emitância radiante espectral da água e do quartzo em relação a um corpo negro podem ser vistos na Figura 10. Observa-se que a curva do quartzo não coincide com a curva de um corpo negro em comprimentos de onda de 8 a 12 μm; portanto, se se quer diferenciar o quartzo da água - que tem uma curva de emitância que praticamente coincide com um corpo negro - devem-se analisar bandas que estejam nessa faixa de comprimento de onda.

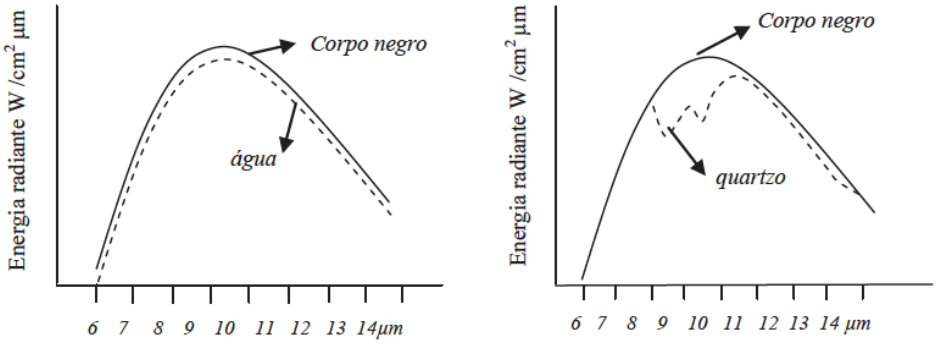


Figura 10: Curvas de emitância radiante espectral da água e do quartzo, em comparação a um corpo negro.

Logo, as imagens termais, além de permitirem a determinação da temperatura da superfície terrestre, ainda são úteis na identificação dos materiais, uma vez que cada material apresenta

uma curva de emitância espectral característica, dependendo do comprimento de onda.

Porém, para se entender o uso das imagens termais, uma distinção faz-se necessária. Os sensores de infravermelho termal registram a intensidade da radiação equivalente à temperatura radiante do terreno, a qual é diferente da temperatura cinética verdadeira, T_{kin}. Esta última é medida com um termômetro e equivale ao grau de agitação das partículas; essa agitação faz as partículas emitirem um fluxo radiante (dado em unidades de potência), o qual - quando concentrado - produz a temperatura radiométrica (T_{rad}) ou aparente, que é medida pelo sensor. A relação entre as duas temperaturas é dada pela Equação 4.5.

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} \cdot T_{kin} \tag{4.5}$$

Como a emissividade tem módulo menor que a unidade, a temperatura radiométrica é sempre menor que a cinética, aproximando-se dela no caso de materiais com alta emissividade, como a água destilada.

Contudo, a resposta espectral dos materiais depende não somente da emissividade dos mesmos, mas de outros fatores, como a intensidade da radiação solar no dia e horário em que uma imagem é obtida. Em dias com menor insolação, as temperaturas e energias radiantes serão menores do que em dias com maior insolação, o que produz imagens com diferentes níveis de cinza para um mesmo material. Com o objetivo de evitar essa discrepância, as imagens de sensoriamento remoto são obtidas, em geral, antes do amanhecer, quando o calor da insolação já foi dissipado e a temperatura do material está mais próxima do normal, o que depende somente de propriedades intrínsecas ao material, como calor específico, condutividade e densidade.

4.3 BANDAS NA FAIXA DO TERMAL (JENSEN, 2011, p. 251-278)

Como foi explicado na subseção anterior, todo corpo acima do zero absoluto emite radiação eletromagnética. Desse modo, todos os objetos e materiais que são encontrados no cotidiano (como água, solo, rochas e organismos vivos) emitem radiação eletromagnética infravermelha termal na faixa de 3 a 14 μm de comprimento de onda.

Ondas nesse comprimento do espectro não podem ser percebidas pelos olhos humanos, sendo simplesmente reconhecidos pelo tato, que detecta a transmissão de energia na forma de calor. Como essa energia radiante é obtida a grandes distâncias das fontes emissoras (o Sol ou um prédio em chamas, por exemplo), sabe-se que a transmissão de energia está ocorrendo por irradiação eletromagnética.

Para tornar a compreensão do infravermelho mais precisa, uma vez que o tato humano não é o mais aguçado dos sentidos, cientistas criaram sensores de radiação infravermelha, capazes de registrar a emissão de ondas mais longas que o visível de uma cena na forma de uma imagem. Assim como o aspecto visual (*i.e.* visível) de um objeto o identifica, sua emissão eletromagné-

tica na faixa do infravermelho termal também o distingue de outros objetos ou materiais, uma vez que cada um tem a sua própria curva característica de absorção e emissão de infravermelho. Além da identificação do tipo de material, a emissão infravermelha permite caracterizar a alteração nas propriedades termais de objetos ou fenômenos naturais. Isso ocorre, por exemplo, quando pessoas desenvolvem certas doenças ou apresentam inflamações (o que é descoberto por exames de termografia), quando há poluição, falha no isolamento térmico de um prédio ou em um componente eletrônico, ou estresse na vegetação.

Quem descobriu a associação de ondas com frequência inferior ao vermelho (daí o nome *infravermelho*) foi o astrônomo inglês Sir Frederick Herschel (1738-1822), que decompôs a luz branca nas suas componentes primárias usando um prisma transparente; o cientista, então, empregou um termômetro para medir a temperatura de cada cor do espectro, descobrindo que as cores ficavam mais quentes à medida que se aproximavam do vermelho, sendo que esse efeito aumentava para regiões do espectro anteriores ao vermelho.

Ao longo do século XX, várias tecnologias de detecção de ondas na faixa do infravermelho foram desenvolvidas especialmente por razões militares, uma vez que imagens infravermelhas podem ser obtidas tanto de dia como de noite e permitem identificar pessoas e bases militares de inimigos com precisão, e a certa distância. Posteriormente, empresas privadas adotaram as tecnologias de detecção do infravermelho para fins civis, como para exploração de petróleo. Com o tempo, sensores de infravermelho foram incorporados aos satélites e aeronaves de empresas privadas e de governos que obtinham imagens da superfície terrestre.

A interpretação de imagens termais da superfície terrestre não é, porém, tão trivial quanto pode parecer, uma vez que não segue exatamente os mesmos princípios de análise de imagens na faixa do visível. O analista dessas imagens deve entender como as ondas curtas (de alta frequência) emitidas pelo Sol interagem com a atmosfera e os materiais presentes na superfície terrestre (sendo absorvida e transformada em ondas maiores), como a energia emitida pelo terreno interage com a atmosfera, e como o sensor de infravermelho é capaz de registrar a informação termal. Ainda, é necessário considerar que o próprio terreno e o sensor podem introduzir ruídos na imagem termal, inutilizando-a ou gerando uma interpretação errônea.

Como as partículas com temperatura acima do zero absoluto possuem não só calor cinético (ou calor verdadeiro, devido à agitação aleatória), mas também emitem radiação infravermelha por um fluxo radiante, pode-se medir dados termais de um objeto por técnicas de sensoriamento remoto.

Felizmente, as medições de temperatura radiante por técnicas de sensoriamento remoto obedecem com pequenos desvios ao modelo estabelecido pela Equação 4.5, em sua relação com a temperatura verdadeira, medida *in situ* com termômetros convencionais. No caso da água (com emissividade próxima da unidade), a relação é praticamente uma função identidade ou bissetriz dos quadrantes ímpares ($y(x) = x$), havendo pequenos desvios por imprecisão de medidas empíricas. Essa confirmação experimental garante a validade da medição de temperatura por métodos de sensoriamento remoto.

A detecção de radiação infravermelha é permitida também pela natureza das emissões solares e da atmosfera terrestre. O Sol emite basicamente radiação visível, em comprimentos de onda curtos. A atmosfera terrestre não é transparente a todos os comprimentos de onda, mas permite que boa parte das ondas chegue até a superfície, onde elas são absorvidas pelos materiais presentes e reemitidas na forma de onda com comprimento maior, *i.e.* infravermelho.

Parte dessa radiação reemitida é capaz de atravessar a atmosfera e chegar aos sensores em satélites e aeronaves, capazes de fornecer imagens térmicas da superfície terrestre. Desse modo, tanto o infravermelho refletido (0,7 a 3,0 μm) como o infravermelho termal (3 a 14 μm) são detectados por sensores, pois a atmosfera é transparente a eles; diz-se que estão em uma janela atmosférica. Uma representação das janelas atmosféricas, as regiões do espectro que são transmitidas pela atmosfera, é mostrada nas áreas brancas da Figura 11. A outros comprimentos de onda, como os de frequência maior que o visível ou menor que o infravermelho, a atmosfera é opaca, uma vez que energia eletromagnética nesses comprimentos de onda são absorvidos por gases atmosféricos, como o vapor de água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2) e o ozônio (O_3). Por isso, é impraticável obter dados por sensoriamento remoto nesses faixas de comprimento de onda do espectro eletromagnético.

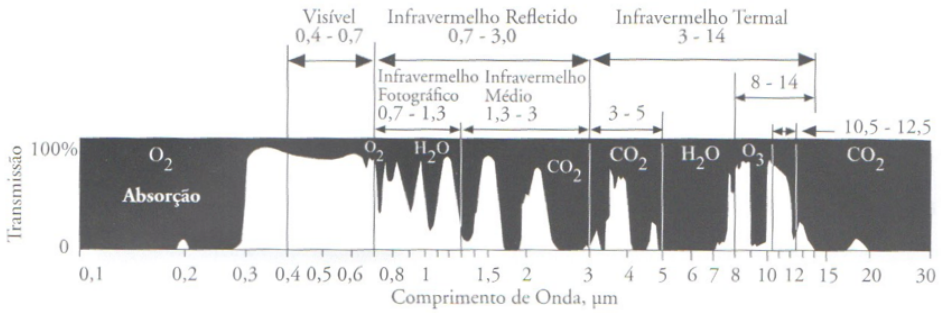


Figura 11: Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético (Jensen, 2011).

Para aumentar a sua resolução espectral, os sensores são em geral construídos para serem sensíveis somente aos comprimentos de onda do infravermelho capazes de atravessar a atmosfera. Para o infravermelho termal, em geral, os sensores são divididos em dois tipos: um capta energia em comprimentos de 3 a 5 μm, e outro de 8 a 14 μm, uma vez que essas são as duas grandes janelas atmosféricas no infravermelho termal. Essas são as bandas utilizadas pelos sensores suborbitais - aqueles que vão acoplados em aeronaves. Como, contudo, o ozônio atmosférico absorve ondas na faixa de 9,2 a 10,2 μm, os sensores orbitais substituem o último sensor por um na faixa de 10,5 a 12,5 μm, a fim de evitar essa região "escura".

Além de procurar sensores que captem comprimentos de onda aos quais a atmosfera é transparente, as técnicas de sensoriamento remoto precisam aplicar a lei de Wien para compreender qual é o melhor sensor para captar um determinado objeto ou material de acordo com sua temperatura, uma vez que, para temperaturas maiores menor é o comprimento de onda do pico de emissão, de modo que o sensor escolhido deve ser sensível a ondas em uma região próxima a

esse pico.

Ainda, o sensoriamento remoto exige a aplicação do conceito de emissividade. Como os corpos reais não são corpos negros, mas irradiam seletivamente, variando sua emissividade de acordo com o comprimento de onda, dois objetos próximos espacialmente um do outro podem estar em equilíbrio térmico (no que diz respeito à temperatura cinética verdadeira), mas apresentarem diferentes temperaturas aparentes ou radiantes, obtidas por técnicas de sensoriamento remoto. A emissividade de um objeto pode variar ainda de uma imagem para outra, devido a variações sazonais (que alteram o teor de umidade do solo, por exemplo), ao grau de compactação do solo, ao campo e ângulo de visada do sensor.

A lei de radiação de Kirchoff (Equação 4.4) permite concluir ainda que bons absorvedores e, portanto, maus refletores, como a água, aparecem como quentes em imagens infravermelhas, ao passo que bons refletores e, portanto, maus absorvedores, como superfícies metálicas, aparentam ser frias nas mesma imagens.

Para captar dados de infravermelho por sensoriamento remoto, utilizam-se escaneadores termais de varredura transversal e detectores CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) de varredura eletrônica em formação linear ou matriz bidimensional.

Para os escaneadores infravermelhos termais, o diâmetro da área circular (do *pixel*, embora os sensores em geral sejam quadrados) do terreno visto pelo sensor é o produto do ângulo instantâneo de visada do sensor (β, dado em milirradianos) e da altitude do sensor acima do terreno - H, dada em metros. O ângulo de visada varia, em geral, para sensores termais suborbitais, de 0,5 a 5 mrad.

Para fazer uma varredura transversal, a fuselagem da aeronave, na qual o sensor está acoplado, tem um motor elétrico que permanece paralelo à direção de voo, de modo que um espelho com faces com 45^o entre si é acionado, tendo o campo de visada instantâneo do sensor. O espelho, assim, consegue varrer o terreno a um ângulo perpendicular à direção do voo no nadir da aeronave, de sorte que o campo de visada totalmente coberto chega a 90^o ou até 120^o, dependendo do sensor.

No solo, existem ainda fontes frias e quentes, cuja temperatura é conhecida, que servem para calibrar o sensor. O fluxo radiante de energia infravermelha é captado pelo espelho, que o focaliza no detector; quanto mais fótons forem captados maior é a potência do sinal. Esses sensores de infravermelho são, geralmente, compostos de um dos três materiais a seguir: antimoneto de índio ($In : Sb$ que é bem sensível a comprimentos de onda próximos a 5 μm), germânio dopado com mercúrio ($Ge : Hg$ com pico de sensibilidade nos 10 μm) ou telureto de cádmio-mercúrio - $Hg : Cd : Te$, sensível no intervalo de 8 a 14 μm.

Para evitar que os detectores recebam energia radiante dos objetos internos que compõem o próprio sensor (em vez de receberem fótons provenientes do terreno em si), os mesmos são refrigerados a baixas temperaturas ($73K$ ou -196^oC) com hélio ou nitrogênio líquidos. Além disso, como a superfície terrestre não é um bom emissor de radiação infravermelha, o sinal

é geralmente amplificado, sendo registrado em uma fita magnética ou outro dispositivo para depois ser convertido de analógico para digital e, então, ser analisado.

Se for o objetivo, o sinal de radiação infravermelha pode ainda ser utilizado para modular uma fonte de luz que reflete luz visível sobre o espelho de um gravador na outra extremidade do eixo motorizado. Nessa situação, reverte-se o processo, de modo que o fluxo radiante de luz visível proporcional à intensidade da radiação infravermelha é utilizado para expor um filme fotográfico linha-a-linha e *pixel*-a-*pixel*, permitindo-se criar uma imagem infravermelha termal do terreno.

Outro fator importante a se considerar em sistemas de varredura multi-espectrais é a lei do inverso do quadrado, que diz que a intensidade da radiação emitida por uma fonte pontual varia com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e o receptor. Isso significa que é possível ter-se um sinal mais intenso se o detector do sistema de sensoriamento remoto estiver o mais perto possível da fonte, que é a superfície terrestre. Por esse motivo, tenta-se realizar voos a altitudes mais baixas para se conseguir imagens com *pixel* menor; entretanto, voos mais baixos exigem que haja mais linhas de voo para cobrir uma mesma área, comparado a voos em maiores altitudes. Ainda, imagens de várias linhas de voo são difíceis de serem mosaicadas, *i.e.* sobrepostas umas às outras para formar uma imagem completa de toda a região estudada, que é o mosaico.

A amplitude do campo de visada também é importante nos sensores, uma vez que quanto maior o campo de visada, melhor será a resolução radiométrica - a capacidade de se distinguir entre diferenças pequenas na energia radiante que emerge de um elemento do terreno. Contudo, um campo de visada muito grande impede que o sensor permaneça por mais tempo em cada elemento do espelho ao longo da varredura considerando uma velocidade constante, o que produz uma resolução espacial pior. Em geral, para compensar esse dois efeitos, adota-se um campo de visada de 2,5 mrad, o que já é considerado uma amplitude grande.

Além das considerações gerais sobre o imageamento por varredura, é preciso conhecer os parâmetros geométricos de obtenção de imagens desses sensores de infravermelho. O primeiro deles é a largura da faixa de imageamento do terreno (gsw), que é a extensão da faixa imageada remotamente pelo sensor durante uma varredura transversal completa do espelho de varredura. Ela cresce com o ângulo de visada do sensor (θ) e sua altitude de voo (H), conforme a a Equação 4.6. Embora toda a largura de imageamento é obtida como imagem, os estudiosos do sensoriamento remoto ordinariamente usam os dados escaneados transversalmente que estão nos 70% centrais da faixa (35% de cada lado do nadir do sensor), porque os elementos do terreno tem células (*pixels*) maiores à medida em que se afastam do nadir.

$$gsw = tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot H \cdot 2 \tag{4.6}$$

O segundo parâmetro geométrico é o tamanho das células de resolução do terreno (D), que

é o diâmetro da superfície circular que é vista pelo sensor. Essa superfície circular, quando localizada exatamente no nadir do sensor, possui diâmetro igual ao produto entre a altitude do sensor e o campo de visada instantâneo do sensor - $D = H \cdot \beta$. Quanto mais distante do nadir está o campo de visada instantâneo do sensor, mais deformada este círculo fica, transformando-se em uma elipse, uma vez que aumenta a distância entre o sensor e a aeronave. A Figura 12 ilustra esse fenômeno.

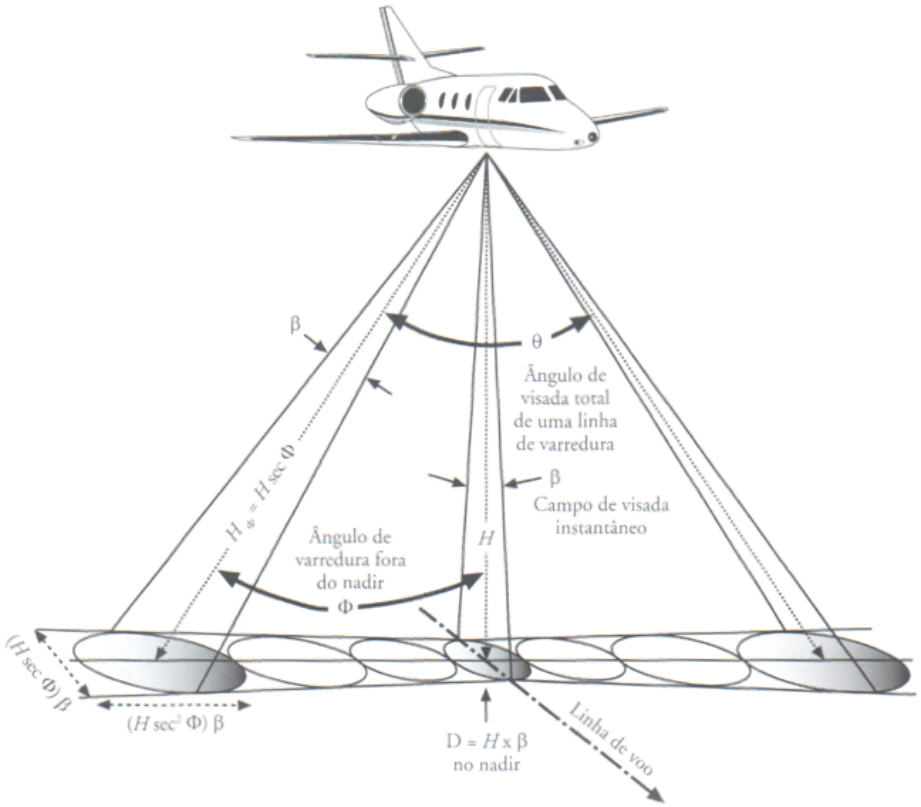


Figura 12: Representação esquemática de aeronave dotada de câmera para sensoriamento remoto (Jensen, 2011).

O terceiro parâmetro é o deslocamento unidimensional do relevo. Sabe-se que fotografias aéreas e verticais possuem um único ponto no nadir exatamente abaixo do sensor no momento da exposição. Isso faz com que todos os pontos que estão acima da elevação local do terreno se desloquem de sua posição planimétrica própria para fora do ponto central do nadir. Nas imagens infravermelhas por varredura transversal, o deslocamento do relevo é produzido na direção perpendicular à linha de voo para todas as linhas de varredura. Quanto maior a altitude do objeto acima do terreno e sua distância em relação ao nadir da linha de voo da aeronave, maior é a magnitude do deslocamento unidimensional do objeto, a qual ocorre para ambas as direções para fora do nadir.

O deslocamento unidimensional pode ajudar ou atrapalhar a interpretação de imagens infravermelhas. Quando aquilo que é deslocado é um objeto que estaria, de outro modo, "escondido"na imagem, o deslocamento favorece a análise dos dados desse objeto. Se, porém, o

deslocamento de outro objeto se sobrepõe à imagem do objeto de interesse, tem-se um desfavorecimento. De qualquer maneira, o deslocamento do relevo produz sérios erros planimétricos nas imagens de sensoriamento remoto infravermelho, por deslocar os topos dos objetos altos. Desse modo, as imagens termais exigem correção geométrica antes de serem produzidos mapas por meio delas.

O quarto parâmetro geométrico é a distorção tangencial de escala. Considerando que a velocidade de rotação do espelho do sensor é constante, o sensor varre uma distância geográfica menor no seu nadir do que em regiões nas bordas. Isso tende a comprimir as feições no eixo perpendicular à linha de voo, à medida em que se afastam do nadir. Esse efeito é a distorção tangencial na escala. Isso faz com que as imagens infravermelhas de objetos próximos ao nadir do sensor tenham o seu formato próprio e imagens distantes do mesmo tenham sua forma distorcida por compressão. Assim, elementos lineares (como estradas, linhas de energia, *etc*) apresentam formas sigmoides (formato de "s"), exceto se forem paralelas à linha de voo.

Para resolver a distorção tangencial, alguns sensores de infravermelho possuem espelhos com velocidade que varia continuamente. Quando, porém, imagens obtidas por esses sensores não estão disponíveis, trabalha-se, como já dito, com apenas os 70% centrais da faixa de imageamento, além de se fazer uma retificação geométrica utilizando pontos de controle do campo. Mesmo assim, devido a movimentos indesejáveis da aeronave com o sensor infravermelho, é bem difícil retificar os dados para uma projeção cartográfica de maneira precisa. Para isso, no entanto, a maior parte das empresas se usam de sistemas de GPS e de navegação inercial a fim de obter a localização da aeronave com maior precisão, além de medir os movimentos indesejáveis da mesma. Esses dados podem ser utilizados para corrigir geometricamente as imagens, sem que se precise de dados de pontos de campo.

Além dos parâmetros geométricos que podem introduzir erros nas imagens de infravermelho termal, há outros fatores que exigem correções ou calibrações radiométricas. Para que dados de temperatura de superfície possam ser obtidos por uma imagem de sensoriamento remoto, é preciso compensar a absorção e a emissão da atmosfera na radiância que chega ao sensor, e corrigir os efeitos de emissividade da superfície, que estão acoplados com a temperatura, na radiância emitida pela superfície. Para essas correções radiométricas, pode-se utilizar um corpo negro interno de referência ou ainda referência empírica externa baseada em coleta de dados *in situ*.

Quando um sistema de varredura transversal é utilizado para obter dados termais de infravermelho, o detector visa inicialmente um alvo de referência frio a um ângulo de cerca de 120^o do terreno, e depois um alvo de referência quente em cada linha de varredura. Desse modo, a temperatura cinética verdadeira é constantemente monitorada e registrada em disco pelo sistema de sensoriamento remoto. Se necessário, os valores de brilho do terreno coletados podem ser convertidos para dados de temperatura cinética aparente com base nos dados das fontes fria e quente, o que garante um resolução radiométrica de aproximadamente $0,2^oC$ para mais ou para menos. Esse é o método que usa uma fonte de referência interna, e seria ideal por dispensar

o trabalho *in situ*. Contudo, este método não considera a atuação da atmosfera na emissão ou absorção de energia radiante.

Já o método de referência externa permite incorporar o efeito da atmosfera na calibração radiométrica dos sensores. Para isso, é necessário tomar medidas em campo, medindo a temperatura cinética verdadeira de um objeto ou corpo d'água com um termômetro, ou utilizando um radiômetro portátil para medir a temperatura radiante do terreno em um campo de visada instantâneo, ou ainda um balão meteorológico com instrumentos que obtenham perfis atmosféricos de temperatura, pressão e umidade.

Para se fazer as medidas de temperatura, pode-se utilizar um termômetro, que é um instrumento de medida direta em campo, ou ainda um radiômetro, que, apontado para o terreno, fornece o valor de temperatura radiante aparente. Deve-se lembrar ainda que a medida de temperatura deve ser feita de maneira simultânea com a obtenção dos dados por sensoriamento remoto, sendo que a localização precisa de cada medição de temperatura é determinada por sistemas de GPS. Desse modo, é possível localizar os pontos em que se coletou os dados *in situ* nos dados retificados do sensor remoto, extraindo-se os valores de brilho desses locais, o que exige uma elevada correção geométrica dos dados infravermelhos termais.

Logo, registram-se as medidas de temperatura em campo com as correspondentes medidas de brilho nas mesmas localizações. Assim, pode-se plotar essas medidas em um gráfico cujo eixo horizontal seja a temperatura cinética verdadeira (medida *in situ*) e o eixo vertical represente o valor de brilho não calibrado obtido por sensoriamento remoto. Pode-se, então, realizar regressões lineares ou não lineares que relacionem as duas variáveis, sendo que, em geral, as aproximações por polinômios de ordem maior que 1 são mais precisas que regressões lineares; um polinômio de quarta ordem, por exemplo, pode ser usado ao se considerar a emissividade do terreno com influência na temperatura. Essas relações podem ser utilizadas para calibrar os dados do sensor remoto, embora este método despreze os fatores intervenientes da atmosfera no momento da coleta dos dados.

São esses dados radiometricamente calibrados que podem ser utilizados para confeccionar mapas de temperatura. Contudo, esse método exige uma logística complexa e financeiramente onerosa, o que nem sempre o torna prático.

Quando não é viável tomar medidas de temperatura *in situ*, para que os efeitos de absorção e emissão atmosféricas sejam considerados nos dados de infravermelho termal, é possível utilizar ainda dois outros métodos.

O primeiro deles é o emprego de radiossondas e modelagem de transferência radiativa atmosférica. Para que ele seja utilizado, é necessário o lançamento de radiossondas seja feito coincidentemente aos sobrevoos noturnos e diurnos. Esses lançamentos permitem que se obtenham perfis atmosféricos de temperatura, pressão e umidade, os quais transmitidos para o solo, onde são incorporados em um modelo de transmissão atmosférica, permitem calcular as características de transmissão atmosférica.

Os resultados dos modelos de transmissão são combinados com curvas de resposta espectral calibradas com as curvas individuais dos detectores de infravermelho termal e com dados da fonte de referência do corpo negro interno registrados durante o voo. O modelo, então, é capaz de produzir uma tabela que converte os dados de brilho de cada *pixel* em temperatura cinética verdadeira. Como a tecnologia de radiossondas ainda é de uso muito restrito, pode-se utilizar os dados de uma estação meteorológica (ou os dados obtidos em um aeroporto) para se obter o perfil atmosférico que alimenta o modelo.

O outro método é o uso da abordagem *split-window*, em que as temperaturas de brilho obtidas para um sensor termal são corrigidas, ao se considerar os efeitos atmosféricos, por uma diferença linear entre as temperaturas de brilho de outros canais termais.

Além dos aspectos mais relacionados à obtenção das imagens - como o efeito atmosférico sobre a qualidade dos dados de infravermelho - as imagens de bandas termais são ainda influenciados por fatores naturais, que sempre estão presentes em sua obtenção. O mais importante desses fatores é o ciclo diário de iluminação da superfície terrestre e sua influência no aquecimento de objetos.

Logo após o nascer do Sol, a Terra intercepta predominantemente ondas curtas, de 0,4 a 0,7 μm. Durante o período iluminado, a superfície terrestre intercepta as ondas de comprimento curto e reflete-as, em sua maioria, de volta para a atmosfera, o que pode ser captado por sensoriamento remoto. Uma parte da energia de ondas curtas, contudo, é absorvida pela superfície e rerradiada para a atmosfera na forma de comprimentos de onda na faixa do infravermelho termal - 3 a 14 μm.

A superfície terrestre tem um máximo de emissão de ondas longas após o meio dia (em torno de duas a quatro horas da tarde), em que há um pico de incidência de ondas curtas, pois o solo requer um certo tempo mínimo para ser aquecido. Há um "excesso"de energia durante o dia justamente devido à reflexão de ondas curtas e à emissão de ondas longas. Caso se desconsiderasse a luz emitida pela Lua e pelas estrelas, não haveria mais luz de onda curta emitida ou incidente sobre o solo depois que o Sol se põe. Contudo, durante a noite, a superfície continua a emitir ondas longas.

A temperatura radiante de diferentes objetos - constituídos dos mais variados materiais, como água, solo, vegetação, rochas, *etc* - possuem valores distintos entre si e que variam periodicamente, com ciclos de 1 dia de duração, conforme se observa na Figura 13. É justamente a diferença no brilho radiante de cada material que permite aos sensores apresentarem uma imagem com contraste radiométrico, o que ajuda a identificar diferentes formas e objetos. No entanto, perto do nascer e do pôr do Sol alguns objetos apresentam a mesma temperatura radiante, como solo, rocha e água. Nesses períodos, portanto, não se recomenda a obtenção de dados térmicos por sensoriamento remoto.

A amplitude da variação da temperatura radiante ao longo do ciclo diário depende não só da capacidade de refletir e absorver a energia radiante solar, mas também de propriedades tér-

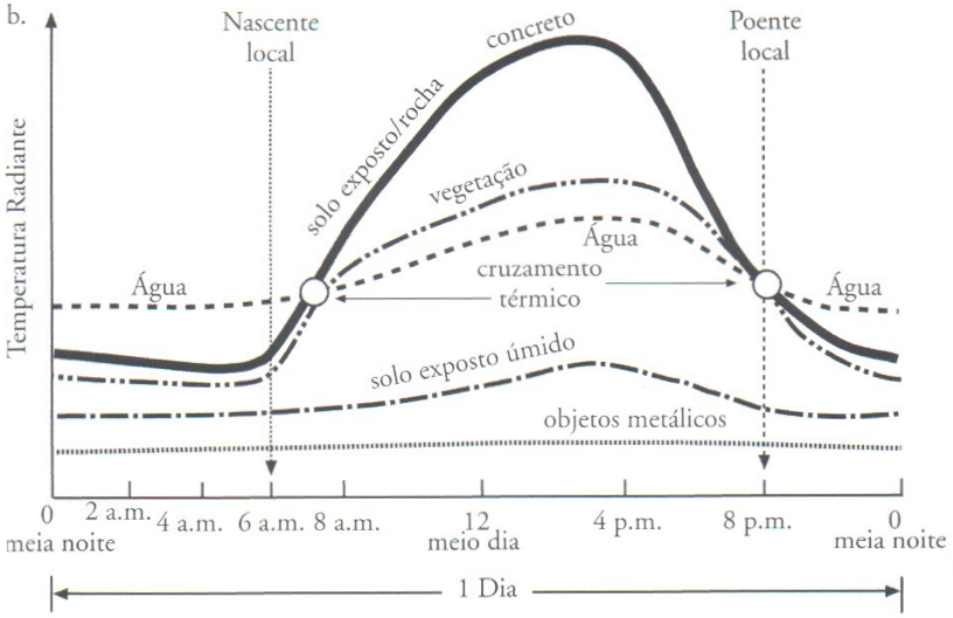


Figura 13: Temperatura radiante diária de vários materiais (Jensen, 2011).

micas dos materiais. A água, por exemplo, possui um calor específico de cerca de 1 cal/g ^oC, que é muito superior ao de outros materiais como solo e rochas, o que a torna mais estável termicamente, *i.e.* com menor amplitude de variação térmica.

O solo e as rochas (o que inclui rochas artificiais, como o concreto), em imagens diurnas, aparecem mais claros que a água, por estarem mais quentes, uma vez que, aumentando a sua temperatura mais rapidamente que a água, apresentam uma temperatura aparente mais elevada. Esses dois materiais continuam ainda a perder calor para a atmosfera durante a noite. No início da noite, eles estão ainda mais quentes que a superfície circunvizinha e que a água, porém próximo da meia noite já radiaram quase toda a energia eletromagnética absorvida durante o dia, enquanto a água - com alta capacidade térmica - mantém uma temperatura mais estável, que pode ainda ser maior que a do solo e das rochas até perto do amanhecer. Desse modo, a água será mais clara em imagens noturnas, quando comparada ao solo, às rochas e até à vegetação em certas circunstâncias. A vegetação, que contém água, tende a se comportar de modo semelhante à água, com temperatura superior ao solo e rochas durante a noite, mas inferior durante o dia.

Porém, como possui outros compostos de capacidade térmica inferior à da água, a vegetação tende a ser mais quente que a água durante o dia, mas mais fria nas horas anteriores ao amanhecer. O mesmo efeito ocorre ao se analisar o comportamento térmico de solos úmidos. Esses, quanto mais saturados forem, tendem a ter comportamento mais próximo do da água, ou seja, maior estabilidade térmica. E os objetos metálicos, tendem a aparecerem mais escuros (mais frios) nas imagens térmicas, devido à sua baixa emissividade.

Desse modo, para fins de análise de imagens térmicas, é preferível obterem-se imagens antes do amanhecer, uma vez que as ondas curtas refletidas podem criar sombras indesejáveis em imagens diurnas; perto das 4h00 a maioria dos materiais apresenta temperaturas de equilíbrio

estáveis, e as derivadas das curvas de temperatura radiante no tempo são quase nulas; as correntes de convecção de ar são menos intensas nesse horário, o que garante uma melhor precisão no voo e evita falhas na imagem.

4.4 SATÉLITES QUE FORNECEM IMAGENS GRATUITAS

4.4.1 LANDSAT 8

O projeto Landsat é a mais longa coleção de dados espaciais continuamente adquirida por sensoriamento remoto com resolução moderada. Operando há quatro décadas, o acervo de imagens coletadas fornece fontes únicas para aqueles que trabalham nas mais diversas áreas, como geologia, agricultura, engenharia florestal, planejamento regional, educação, mapeamento e análise de mudanças globais; são ainda úteis para respostas emergenciais e de socorro em casos de desastre.[7]

O projeto Landsat foi criado como uma iniciativa do Serviço Geológico Americano (USGS) e da Agência Espacial Americana (NASA), com o objetivo de fornecer dados geológicos para apoio ao governo americano, além de instituições civis, industriais, militares e comunidades educacionais dos EUA e de outras regiões do mundo.[8]

Ao longo dos anos em que o projeto está em operação, vários satélites já foram lançados e postos em órbita: 8, no total, sendo que o primeiro a ser posto em órbita (Landsat 1) foi lançado em 23 de julho de 1972. O último (Landsat 8) foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, como parte da Missão de Continuidade de Dados do Landsat (LDCM), sendo que seus dados tornaram-se disponíveis em 30 de maio do mesmo ano. Esse último continua a oferecer imagens de alta qualidade, capazes de satisfazer aos critérios científicos e operacionais da NASA e do USGS para observação do uso e alteração do solo.[9] As organizações norte-americanas planejam ainda lançar o nono satélite do programa por volta de dezembro de 2020. [10]

O oitavo satélite do programa Landsat, lançado em 2013 pela NASA de uma base da Força Aérea Americana em Vandenberg na Califórnia, possui uma órbita heliossíncrona com altitude de 705 km, fazendo 233 revoluções ao redor da Terra em cada ciclo, de modo a cobrir toda a superfície terrestre a cada 16 dias, exceto para as latitudes polares mais altas. Assim, o Landsat 8 circunda a Terra a cada 98,9 minutos, cruzando o equador às 10h00 com uma precisão de 15 minutos para mais ou para menos.[11]

[7] Fonte: https://landsat.usgs.gov/landsat-project-description; acesso em 06/04/2017.
[8] *Ibid.* idem.
[9] *Ibid.* idem.
[10] Fonte: https://landsat.usgs.gov/landsat-9-history; acesso em 06/04/2017.
[11] Fonte: https://landsat.usgs.gov/landsat-8-history; acesso em 06/04/2017.

O Landsat 8 tem dois módulos sensores: o Imageador Terrestre Operacional (OLI) e os sensores térmicos do infravermelho (TIRS). O primeiro módulo possui 10 bandas multi-espectrais, as quais possuem resolução espacial de 30 metros, exceto a banda pancromática, que tem resolução de 15 metros. As bandas são as seguintes: Banda 1 (violeta, com comprimento de onda de 0,43 a 0,45 μm), Banda 2 (azul, de 0,44 a 0,51 μm), Banda 3 (verde, de 0,53 a 0,59 μm), Banda 4 (vermelho, de 0,64 a 0,67 μm), Banda 5 (infravermelho próximo, de 0,85 a 0,88 μm), Banda 6 (infravermelho de onda curta - SWIR 1-, de 1,57 a 1,65 μm), Banda 7 (infravermelho de onda curta - SWIR 2-, de 2,11 a 2,29 μm), Banda 8 (pancromática - PAN, de 0,50 a 0,68 μm), Banda 9 (cirrus - utilizada para a detecção de nuvens -, de 1,36 a 1,38 μm), e, por último, a banda BQA (que é uma banda de avaliação da qualidade da imagem).[12]

Já o módulo TIRS possui sensores para duas bandas: a Banda 10 (TIRS 1) com comprimento de onda de 10,6 a 11,19 μm, e a Banda 11 (TIRS 2) de 11,5 a 12,51 μm, ambas com resolução espacial original de 100 metros, mas sendo fornecidas com resolução de 30 metros. A Figura 14 mostra as bandas do Landsat 8 (superior) e do Landsat 7 (inferior) ao longo do espectro eletromagnético, além de mostrar a fração de energia emitida pelo Sol à qual a atmosfera é transparente.[13]

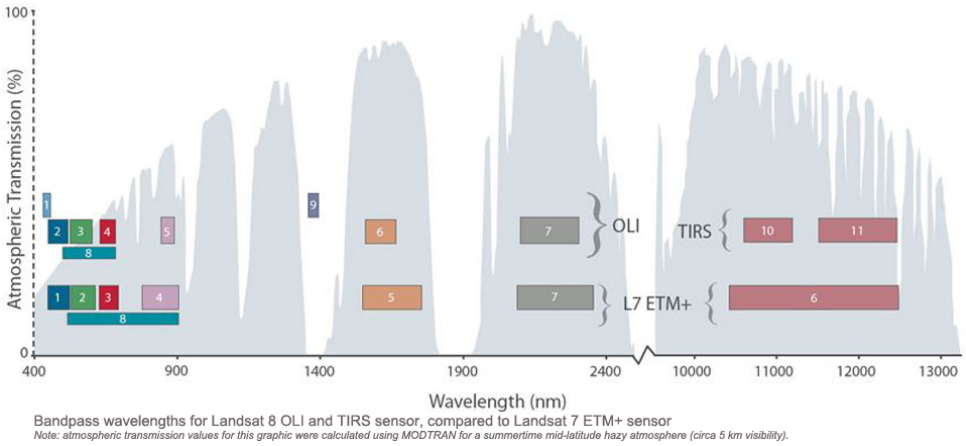


Figura 14: Comparação dos comprimentos de onda para as bandas dos Landsat 8 e 7 (Fonte: https://goo.gl/PbFu4S).

O satélite é capaz de obter imagens retangulares com dimensões de 170 km por 185 km da superfície terrestre, tendo sido projetado para uma vida útil de, no mínimo, 5 anos. [14]

4.4.2 CBERS

As tecnologias de sensoriamento remoto são muito estratégicas para os governos de vários países. Contudo, devido ao elevado custo e especialização técnicas, países subdesenvolvi-

[12] *Ibid.* idem.
[13] *Ibid.* idem.
[14] Fonte: https://landsat.usgs.gov/landsat-8-history; acesso em: 06/04/2017.

dos economicamente não tem todos os recursos e conhecimentos técnico-científicos suficientes para construir um satélite desde o seu início. Por esse motivo, os governos brasileiro e chinês resolveram se unir em uma parceria no ano de 1988, entre o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a CAST (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial), com o objetivo de firmar o assim chamado Programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*, Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), desenvolvendo dois satélites. Com um investimento acima de 300 milhões de dólares dividido de forma desigual entre Brasil e China, o programa buscou implantar um sistema completo de sensoriamento remoto internacional, a fim de monitorar as extensas áreas despovoadas nos territórios de ambos os países com abundantes recursos naturais e enorme potencial agrícola e ambiental.[15]

O Programa buscava desenvolver dois satélites que possuíssem não somente câmeras imageadoras, mas também um repetidor para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais. Assim, os dois satélites do Programa (CBERS-1 e 2) possuem exatamente a mesma especificação técnica, dotados de mesma função e dos mesmos equipamentos a bordo (como câmeras, sensores, computadores, *etc*).[16]

Em 2002, assinou-se outro acordo com o objetivo de, continuando o Programa CBERS, construir dois novos satélites (o CBERS 3 e 4), com divisão igual do investimento entre os países. Como lançar o CBERS-3 só é economicamente viável quando o CBERS-2 já tiver deixado de operar, decidiu-se, em 2004, construir o CBERS-2B, lançado em 2007 e desativado no início de 2010.[17]

A nova geração de satélites (CBERS-3 e 4) possui em sua carga útil quatro câmeras (a saber, a Pancromática e Multiespectral, a Multiespectral Regular, o Imageador Multiespectral e Termal, e a Câmera de Campo Largo), que possuem resolução espacial e geométrica superior às câmeras dos satélites anteriores, embora os satélites ainda mantenham a órbita dos antigos. O CBERS-3 foi lançado incorretamente, voltando à atmosfera terrestre, e o CBERS-4 foi lançado com sucesso no fim de 2014, de uma base chinesa.[18]

Os satélites CBERS-1 e 2 possuem dois módulos: o primeiro é o módulo de "carga útil", que acomoda os sistemas óticos (Câmera Imageadora de Alta Resolução, Imageador por Varredura de Média Resolução e Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada), os quais são utilizados para observar a Terra e para servir o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais; o segundo é chamado de módulo "serviço"e possui dispositivos que asseguram o suprimento de energia, controles, telecomunicações e outras funções necessárias à operação do satélite. O CBERS-2B difere dos anteriores somente por substituir o Imageador por Varredura pela Câmera Pancromática de Alta Resolução.[19]

Os satélites 1, 2 e 2B são dotados de painéis solares que fornecem os 1100 W de potência

[15] Fonte: http://www.cbers.inpe.br/sobre_satelite/historico.php; acesso em: 31/03/2017.
[16] *Ibid.* idem.
[17] *Ibid.* idem.
[18] *Ibid.* idem.
[19] Fonte: http://www.cbers.inpe.br/sobre_satelite/descricao_cbers1e2e2b.php; acesso em: 31/03/2017.

necessários para o seu funcionamento, sendo estes abertos quando o satélite é posto em órbita e se direcionando automaticamente para o Sol. Os satélites possuem ainda um sistema de controle de altitude e, no caso do 2B, um receptor de GPS além de um sensor de estrelas para auxiliar no controle da altitude.[20]

No que diz respeito à órbita, os satélites do CBERS-1, 2 e 2B seguem uma trajetória heliossíncrona com uma altitude de 778 km, com uma frequência de 14 revoluções por dia, cruzando o equador sempre às 10h30 no horário local, o que possibilita condições uniformes de insolação para comparação de imagens de datas diferentes. Desse modo, os satélites conseguem fazer a cobertura da superfície terrestre em 26 dias, quando se utiliza as suas câmeras com campo de visada entre 110 e 120 km; já com a câmera de 890 km, obtém-se uma cobertura completa em 5 dias. [21]

Já os satélites CBERS-3 e 4 também tem uma órbita heliossíncrona, tendo altitude de 778 km e período de 26 dias. A heliossincronização garante uma uniformidade de iluminação no imageamento, uma vez que o ângulo entre o plano da órbita e a linha que une o centro da Terra ao Sol é mantido constante durante toda a missão. Além disso, a órbita é praticamente circular, o que possibilita uma regularidade na escala do imageamento, permitindo a comparação entre objetos em quaisquer posição da órbita em seus tamanhos. O equador é também cruzado às 10h30, o que - além de garantir homogeneidade na insolação entre imagens de datas diferente - garante um valor razoável de irradiação solar, contrastando alvos e permitindo a identificação de nuvens. [22]

Cabe agora discorrer um pouco sobre as câmeras presentes nos satélites do Programas CBERS. A primeira é o Imageador de Amplo Campo de Visada (WFI - *Wide Field Imager*). Essa câmera produz imagens de uma faixa de 890 km de largura, com resolução espacial de 260 m, cobrindo completamente a superfície terrestre em 5 dias. Ela possui um campo de visada de 60^o, e capta imagens em duas bandas: vermelho (com comprimento de onda de 0,63 a 0,69 μm) e infravermelho (0,77 a 0,89 μm).[23]

A segunda câmera importante é a Câmera Imageadora de Alta Resolução (CCD - *High Resolution CCD Camera*), a qual fornece imagens de uma faixa de 113 km e com resolução de 20 m. Apesar de ter um ângulo de visada inicial de $8,3^o$, a câmera CCD consegue variá-lo para $\pm 32^o$, obtendo imagens estereoscópicas de certa região. Ela cobre a Terra em 26 dias, e tem 5 faixas espectrais: a do vermelho e infravermelho, iguais às da câmera WFI, e mais três - a pancromática (0,51 a 0,73 μm), a azul (0,45 a 0,52 μm) e a verde (0,52 a 0,59 μm).[24]

A terceira câmera é o Imageador por Varredura de Média Resolução (IRMSS - *Infrared Multispectral Scanner*), a qual produz imagens na faixa de 120 km de largura com resolução de

[20] *Ibid.* idem.

[21] Fonte: http://www.cbers.inpe.br/sobre_satelite/orbita_cbers1e2e2b.php; acesso em: 31/03/2017

[22] Fonte: http://www.cbers.inpe.br/sobre_satelite/orbita_cbers3e4.php; acesso em: 31/03/2017

[23] Fonte: http://www.cbers.inpe.br/sobre_satelite/cameras_imageadoras_cbers1e2e2b.php; acesso em: 31/03/2017.

[24] *Ibid.* idem.

80 m (exceto no termal, quando é de 160 m), cobrindo a Terra em 26 dias. Ela possui quatro bandas espectrais: pancromática (0,50 a 1,10 μm), infravermelho de ondas curtas (1,55 a 1,75 μm), outra de infravermelho de ondas curtas (2,08 a 2,35 μm) e infravermelho termal (10,40 a 12,50 μm).[25]

A quarta câmera é a Pancromática de Alta Resolução (HRC - *High Resolution Camera*), a qual opera em uma única faixa espectral - a pancromátrica (0,50 a 0,80 μm), que cobre o visível e parte do infravermelho próximo. Produz imagens com 27 km de largura e tem resolução espacial de 2,7 m, demorando 130 dias para varrer toda a superfície da Terra.[26]

A quinta câmera é a Pancromática e Multi-espectral (PAN), a qual cobre imagens em uma faixa de 60 km, tendo uma resolução temporal de 52 dias. Ela possui uma banda pancromática (0,51 a 0,85 μm) e três bandas multi-espectrais (0,52 a 0,59 μm, 0,63 a 0,69 μm, 0,77 a 0,89 μm). Essa câmera possui a melhor resolução espacial de todas, com pixel de 5 metros na pancromática, e de 10 metros nas multi-espectrais.[27]

A sexta é a Câmera Multi-espectral Regular (MUX), que é a nova versão da câmera CCD só que instalada nos satélites CBERS-3 e 4, tendo resolução espacial de 20 metros e temporal de 26 dias. Ela tem quatro bandas: de 0,45 a 0,52 μm, de 0,52 a 0,59 μm, de 0,63 a 0,69 μm e de 0,77 a 0,89 μm.[28]

A sétima é o Imageador Multi-espectral e Termal (IRS), que é uma atualização do Imageador por Varredura dos satélites CBERS-1 e 2. Ela capta imagens com largura de 120 km e resolução espacial de 40 m ou 80 m (na banda termal), tendo resolução temporal de 26 dias. Suas bandas são quatro: de 0,50 a 0,90 μm, de 1,55 a 1,75 μm, de 2,08 a 2,35 μm e de 10,4 a 12,5 μm.[29]

A oitava é a Câmera de Campo Largo (WFI), que é uma atualização da Imageadora de Amplo Campo de Visada dos satélites CBERS-1, 2 e 2B. Ela capta imagens com largura de 866 km e resolução espacial de 64 m. Suas bandas são quatro: de 0,45 a 0,52 μm, de 0,52 a 0,59 μm, de 0,63 a 0,69 μm e de 0,77 a 0,89 μm. A Figura 15 mostra os comprimentos de onda percebidos pelos sensores dos satélites CBERS 3 e 4.[30]

[25] *Ibid.* idem.
[26] *Ibid.* idem.
[27] *Ibid.* idem.
[28] *Ibid.* idem.
[29] *Ibid.* idem.
[30] *Ibid.* idem.

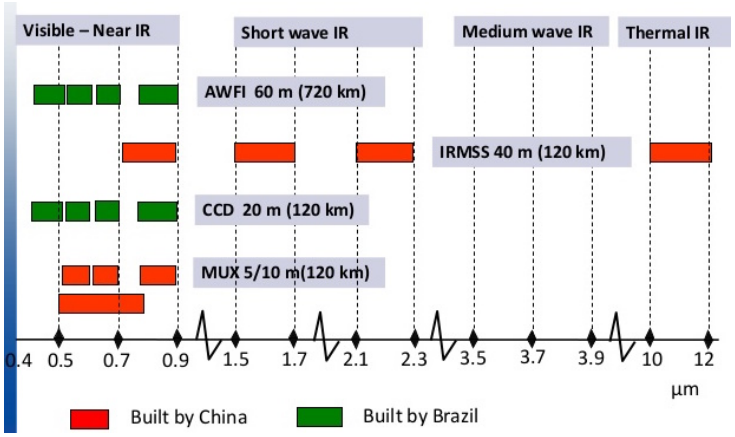


Figura 15: Sensores dos satélites CBERS 3 e 4 (Fonte: https://goo.gl/XrJ8xb).

4.4.3 SENTINEL

A Comissão Europeia (CE) coordena, em parceria com a Agência Espacial Europeia (ESA), o programa Copernicus, anteriormente conhecido como Programa Global de Monitoração para o Meio Ambiente e a Segurança. Esse programa tem como objetivo providenciar informação acurada, rápida e facilmente acessível para melhorar a gestão ambiental, entender e mitigar os efeitos da assim chamada mudança climática (anteriormente conhecida como "aquecimento global"), e prover segurança civil. [31]

Para o Copernicus, a ESA coordena a liberação de dados de mais de 30 satélites, e a Comissão Europeia, que age em favor da União Europeia, é responsável por estabelecer os requisitos dos satélites e administrar os serviços. [32]

Ultimamente, a Agência Espacial Europeia vem desenvolvendo uma nova família de satélites chamados de *Sentinel* ("sentinela"em inglês), com o objetivo específico de prover para as necessidades operacionais do programa Copernicus.[33]

Os satélites da família Sentinel providenciam imagens úteis para determinar todas as condições meteorológicas, a partir das imagens de radares diurnos e noturnos do Sentinel-1A e 1B, lançados, respectivamente, em abril de 2014 e abril de 2016.[34]

Já o Sentinel-2A, lançado em 23 de junho de 2015, foi designado para fornecer imagens de alta resolução para serviços da superfície terrestre. O outro satélite (o Sentinel-2B) juntou-se à órbita no dia 7 de março de 2017.[35]

O satélite-3A, lançado no dia 16 de fevereiro de 2016, providencia informações para dados

[31] Fonte: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3; acesso em 21/04/2017.
[32] *Ibid* idem.
[33] *Ibid* idem.
[34] *Ibid* idem.
[35] *Ibid* idem.

de serviços de importância para o oceano e terra.[36]

Ainda há satélites previstos (Sentinel-4 e 5) que hão de providenciar dados para monitoração atmosférica de órbitas geoestacionárias e polares. Já o Sentinel-6 irá carregar um radar altimétrico para medir dados dos oceanos, para estudos de oceanografia e pesquisas climáticas.[37]

Os satélites Sentinel-2 são uma constelação de dois satélites (2A e 2B) que possuem uma órbita de 786 km de altitude, porém separados em 180^o [38]. Os satélites possuem uma órbita polar e heliossíncrona, passando a cada 5 dias sobre o equador, cobrindo áreas de uma latitude de 84^oN a 84^oS.[39]

Eles possuem sensores multi-espectrais de alta resolução com tecnologia baseada em satélites franceses e americanos anteriores (como os satélites da família Landsat). Seu imageador multi-espectral é o mais avançado de seu tipo, incluindo três bandas no "limite vermelho", que providencia uma informação central no estudo da situação vegetal no mundo. Esse imageador captura imagens em uma faixa de 290 km.[40]

Esses satélites possuem ainda duas bandas largas no visível próximo ao infravermelho e no infravermelho de ondas curtas, sendo que a cada banda correspondem 12 detectores, integrando 450 mil *pixels*. O grande número de *pixels* se dá pela utilidade de repetir partes com falha da imagem por *pixels* redundantes.[41]

Além disso, dois tipos de detectores integram filtros de alta qualidade para isolar as bandas espectrais perfeitamente. A estabilidade opto-mecânica deve ser extremamente precisa, o que exigiu o uso de cerâmica de carboneto de cilício para os seus três espelhos e seu plano focal, e até para a estrutura do telescópio em si.[42]

Cada satélite tem um alto nível de autonomia, de modo que podem operar sem intervenção da base no solo por períodos maiores do que 15 dias. Entretanto, a cobertura de imagem, o armazenamento e transmissão requerem memória de 1 Terabyte por dia. Esse enorme volume de dados é necessário para obter imagens com 13 bandas (de 443 μm a 2190 μm)[43] : 4 sendo visíveis e de infravermelho próximo com resolução espacial de 10 metros, seis na fronteira do vermelho e de onda curta no infravermelho com 20 metros de *pixel*, e três bandas de correção atmosférica de 60 metros de resolução.[44] A Figura 16 mostra uma comparação das bandas dos satélites Landsat 8 e do Sentinel 2 (A e B).

[36] *Ibid* idem.
[37] *Ibid* idem.
[38] Fonte: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Instrument; acesso em: 22/04/2017.
[39] Fonte: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Facts_and_figure; acesso em: 22/04/2017.
[40] Fonte: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Facts_and_figures; acesso em: 22/04/2017.
[41] *Ibid* idem.
[42] *Ibid* idem.
[43] *Ibid* idem.
[44] Fonte: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Instrument; acesso em 22/04/2017.

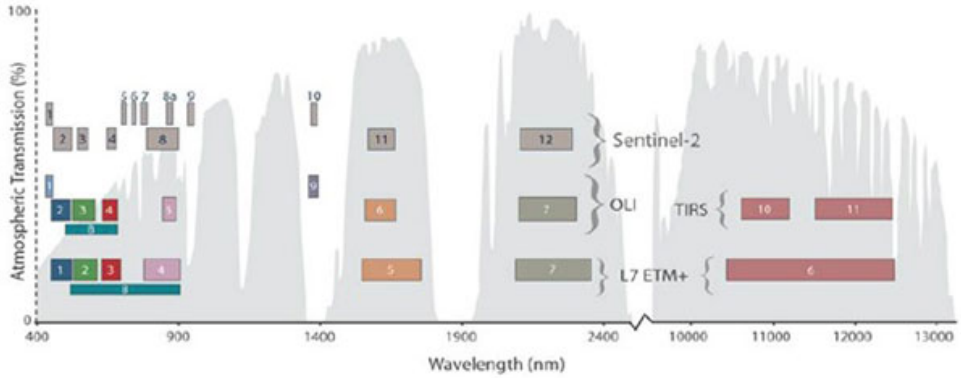


Figura 16: Bandas espectrais do Landsat 8 e do Sentinel 2 (Fonte: https://goo.gl/u5PsPe).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na presente pesquisa se resumiram basicamente às imagens de satélites (LandSat 8 e 5) baixadas gratuitamente do *site* do *USGS* (https://earthexplorer.usgs.gov), cuja relação pode ser vista na Tabela 1, e alguns *softwares* necessários para processar as imagens e os dados obtidos delas.

Tabela 1: Imagens de satélite do DF utilizadas.

Data	Satélite
26/05/1984	LandSat 5
30/05/1997	LandSat 5
24/06/2006	LandSat 5
16/04/2016	LandSat 8
02/05/2016	LandSat 8
21/07/2016	LandSat 8
22/08/2016	LandSat 8
25/08/2017	LandSat 8
10/09/2017	LandSat 8

Para se processar as imagens e se obter cartas e dados de temperatura, relevo e uso do solo, utilizou-se o programa SPRING® (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) em sua versão 5.5.0 de 32 *bits* para sistema operacional *Windows*® em português, que é um programa de código aberto e livre desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DPI-INPE).

Muitas das informações obtidas pelo SPRING® eram dadas na forma de tabelas (principalmente as tabulações cruzadas entre dois planos temáticos, e as medidas de classe de um único plano), as quais precisavam ser tratadas a fim de se obter valores médios e gráficos. Para isso, utilizou-se o editor de planilhas *Excel*® do pacote *Office* da *Microsoft*® da versão do ano de 2010.

As imagens fornecidas pelos satélites abrangiam sempre uma área maior que a do Distrito Federal, englobando-o completamente. Para recortar-se das imagens apenas a área do DF, utilizou-se o limite (em formato *kml*) disponibilizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no endereço eletrônico *http://www.gmapas.com/poligonos-ibge/poligonos-ibge-municipios-distrito-federal*. Ainda, o arquivo em formato *kml* com os limites dos subdistritos do DF (que, em geral, coincidem com as regiões administrativas) foi obtido do censo de 2010 do IBGE, e disponibilizado no endereço eletrônico *https://downloads.ibge.gov.br/downloads_-geociencias.htm*.

Em alguns casos, para se sobrepor duas cartas geradas pelo SPRING® (quando o mesmo programa era incapaz de mostrar todos os planos de informação para se formar uma carta) foi necessário utilizar o programa *Wolfram Mathematica*® em sua nona versão. Nas visitas de campo, utilizou-se uma câmera de celular a fim de se registrar configurações urbanas típicas das localidades.

Para a obtenção dos modelos numéricos de terreno do relevo do DF, foi necessário utilizar o arquivo em formato *dwg* de nome *geral_final_R14*, o qual continha as curvas de nível mestras e intermediárias de todo o DF, sendo disponibilizado na disciplina de Sensoriamento Remoto Aplicado à Engenharia Civil, ministrada no primeiro semestre do ano de 2016.

Por fim, fez-se uso do *Google Earth*® e, em alguns casos, do *Google Maps*® quando era necessário localizar uma determinada região no mapa do DF, a fim de se analisar sua temperatura ou uso do solo ou simplesmente obter um mapa de localização da região buscada, além de permitir criarem-se polígonos utilizados como planos de informação temáticos (para fronteiras ou limites) no SPRING®.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Os métodos utilizadas para se analisar as imagens de satélite utilizadas neste projeto resumem-se a três tipos básicos de operações: o cálculo de temperatura de brilho de superfície, o cálculo do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a determinação do uso e cobertura do solo.

O cálculo de temperatura de brilho de superfície é realizado por meio do ambiente de programação LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) já implementado no próprio SPRING®, conforme se observa na Figura 17.

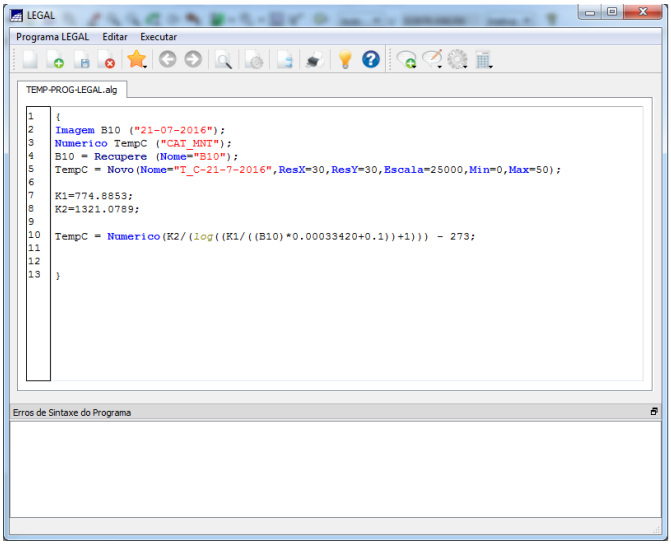


Figura 17: Janela do ambiente LEGAL no SPRING® 5.5.0.

No ambiente de programação, é implementada a Equação 5.1, a fim de se obter um plano do tipo modelo numérico de terreno (MNT), que fornece valores contínuos da temperatura de brilho de superfície (que é um tipo de temperatura radiante) sobre toda a imagem utilizada para o cálculo.

$$Temperatura\ (em\ ^oC) = \frac{K_2}{ln[(K_1/(B_{term} \cdot M_L + A_L) + 1]} - 273,15 \qquad (5.1)$$

Onde:

$L_{term} = B_{term} \cdot M_L + A_L$ é a radiância espectral (dada em $W/(m^2 \cdot srad \cdot \mu m)$), que é a potência de energia radiada por área no comprimento de onda da banda termal, a qual é a banda 6 para o LandSat 5 e a banda 10 ou 11 para o LandSat 8 (embora tenha sido utilizada somente a banda 10 para o cálculo de temperatura [45]);

B_{term} é a imagem do sensor térmico, onde cada *pixel* contém um número digital calibrado em uma escala de 16 bits e representa a emitância (adimensional) da área de cada pixel.

M_L é o parâmetro de ajuste (que tem a mesma dimensão e unidades que a radiância, valendo $5,5375 \cdot 10^{-2}$ para a banda 6 do LandSat 5, e $3,342 \cdot 10^{-4}$ para a banda 10 do LandSat 8, conforme informado nos metadados das imagens);

A_L é o fator aditivo de ajuste (que tem a mesma dimensão e unidades que a radiância, valendo $1,18243$ para a banda 6 do LandSat 5, e $0,1$ para a banda 10 do LandSat 8, conforme os metadados das imagens);

K_1 e K_2 são constantes de calibração do sensor fornecidas nos metadados das imagens, que valem 607,76 (nas mesmas unidades da radiância) e 1260,56 (para o

[45] Conforme Souza e Silva Jr. (2015), calcular a temperatura de brilho de superfície com a banda 10 ou a banda 11 apresenta uma diferença de cerca de apenas 1^oC.

LandSat 5) ou 774,8853 e 1321,0789 (para o LandSat 8), respectivamente.

Com os planos de informação MNT, é possível obter ainda os valores máximo e mínimo de temperatura. Esse plano de informação sofre um fatiamento a fim de se relacionarem seus valores de temperatura com classes em uma categoria temática de temperatura. Assim, o produto do fatiamento é um plano de informação temático com classes discretas de temperatura que englobam os valores de variação contínua do MNT. Para as imagens utilizadas neste projeto, as classes de temperatura criadas (na maioria dos casos) foram, em graus Celsius, temperaturas menores que 0, entre 0 e 20 com passos de 5 graus, entre 20 e 30 com passos de 0,5 grau, e entre 30 e 45 com passos de 1 grau, a fim de se poder ter um bom detalhamento da variação da temperatura.

Com os planos temáticos de temperatura, é possível calcular-se a temperatura média da imagem. Tal procedimento é realizado por uma medida de classes que fornece a quantidade de área da imagem que está dentro de cada classe de temperatura. Fazendo-se uma média aritmética ponderada da temperatura média de cada classe (que é a média aritmética simples dos valores extremos) pela área correspondente, tem-se a temperatura média de uma imagem. Os planos temáticos permitem ainda fazer-se uma tabulação cruzada (Figura 18) com outros planos de informação temáticos (como os de uso do solo), o que permite obter-se a relação e também valores médios de informações dos dois planos temáticos.

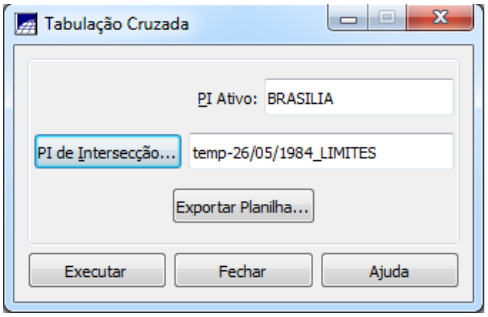


Figura 18: Janela de tabulação cruzada no SPRING® 5.5.0.

Já para o cálculo do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), tem-se que realizar uma operação aritmética simples gerando uma imagem de 32 bits, que não exige uso do ambiente LEGAL. Basta aplicar as operações a aritméticas (conforme a Figura 19) entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho, segundo a Equação 5.2. Para o LandSat 8, o infravermelho próximo é a banda 5 e o vermelho, a banda 4; para o LandSat 5, as bandas são a 4 e a 3, respectivamente.

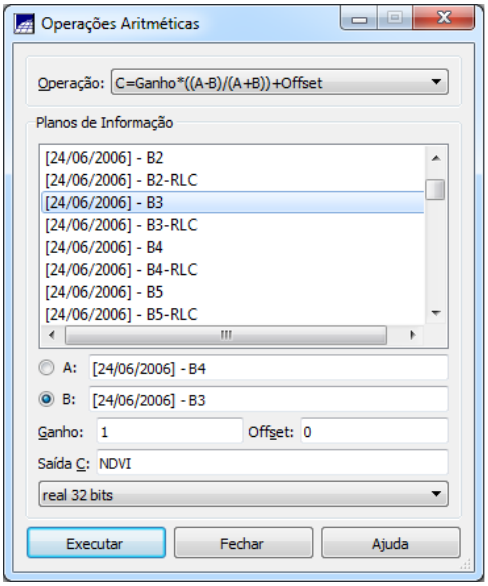


Figura 19: Janela para operações aritméticas no SPRING® 5.5.0.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{5.2}$$

onde:

NIR é a reflectância (adimensional) da banda do infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μm para o LandSat 5 e 0,851 a 0,879 μm para o LandSat 8) e

R é a reflectância da banda do vermelho (0,63 a 0,69 μm para o LandSat 5 e 0,636 a 0,673 μm para o LandSat 8).

Para a determinação do uso do solo, foi preciso fazer uma segmentação das imagens, por meio do método de crescimento de regiões, utilizando-se as bandas de 1 a 7 (exceto a 6) com realce linear de contraste, com uma semelhança de 30 e uma área de *pixels* de 250, além de escolher algumas bandas para compor um contexto para a classificação. Para as imagens do LandSat 5, escolheram-se as bandas 3, 4 e 5 (já com realce linear de contraste), e, para as imagens do LandSat 8, as bandas 4, 5 e 6 já realçadas. Assim, fez-se um treinamento coletando-se amostras das imagens para os usos definidos (floresta, área urbana, área agrícola e corpos hídricos), realizando-se, posteriormente, uma classificação do tipo Bhattacharya com 95% de limiar de aceitação (que é um classificador por regiões). A classificação do uso do solo da imagem de 16/04/2016 (aproveitada de um projeto de inciação científica anterior [46]) foi realizada a partir de uma segmentação (por crescimento de regiões) que continha as bandas de 1 a 7, 10, 11 e o plano de NDVI, em um contexto com as bandas 1 a 7 e o NDVI, utilizando-se do classificador Bhattacharya (com 99% de limiar de aceitação para os usos em geral: corpos hídricos, área construída arborizada, área construída não arborizada, área agrícola, floresta, cerrado, campo e silvicultura) e de 75% para o uso de queimada.

[46] Ver BORGES,2017.

A classificação do uso e cobertura do solo já fornece um plano de informação do tipo temático, o que permite obter-se a área em cada classe (nas operações de medidas de classe), bem como realizar-se operações de tabulação cruzada, com os planos temáticos de temperatura, por exemplo.

O último processo utilizado neste projeto foi a obtenção de uma grade retangular do relevo do DF. Para se obtê-la, é preciso importar para uma categoria de modelo numérico de terreno do SPRING® as curvas de nível mestras e as intermediárias do arquivo em CAD que as contém, cada uma em um plano diferente. Depois, é preciso criar um novo plano de informação contendo todas as curvas de nível, fazendo-se um mosaico. Depois, gera-se uma grade triangular (do tipo *Delauny*, sem linhas de quebra e com menor aresta de triangulação, sendo de 3 metros) das mesmas, e, partir dessa, obtém-se uma grade retangular (Figura 20) e as isolinhas (ou curvas de nível), com passo de 25 metros. Fatiando-se o plano com a grade retangular é possível criar classes de altitude de 50 em 50 metros, de modo que se obtém um plano temático de hipsometria.

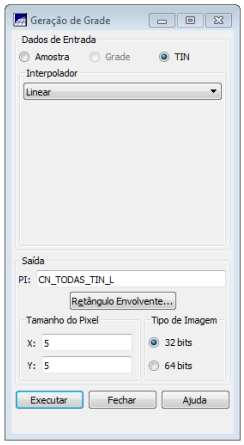


Figura 20: Janela para geração de grade retangular no SPRING® 5.5.0.

Desse modo, a metodologia aqui descrita para análise de temperatura e NDVI pode ser resumida nos seguintes itens:

- Calcular a temperatura de brilho de superfície com a banda 10;
- Fatiar o PI de MNT gerado, com classes de um certo espaçamento de temperatura, formando um plano temático;
- Calcular o NDVI com as bandas do infravermelho próximo e do vermelho e
- Fatiar o NDVI em classes de -1 a 1 para um plano temático, e
- Tirar medidas de classes dos planos temáticos e obter valores médios de temperatura e NDVI.

5.2.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANAS

Inicialmente, era preciso diferenciar as ilhas de calor que ocorrem no DF de outros fenômenos que podem ocasionar a formação de regiões com elevadas temperaturas concentradas em espaços limitados. No DF, devido principalmente ao fato de se ter nos meses de junho a setembro uma estação seca severa em que a umidade relativa do ar chega a valores abaixo dos 10%, ocorrem muitas queimadas naturais (ou queimadas causadas por fatores antrópicos facilmente se alastram por todo o território) no cerrado e em áreas de preservação. As queimadas além de aumentarem a temperatura do solo durante a sua ocorrência são ainda responsáveis por destruir a vegetação e recobrir o solo com uma camada carbonácea negra/cinzenta, removendo do mesmo a capacidade de refletir a radiação infravermelha e causando um aumento da temperatura do solo.

Para averiguar esse fenômeno, utilizaram-se duas imagens recentes do ano de 2017, que estavam com um certo distanciamento temporal entre si, mas que ainda estavam em momentos próximos dos quais se teve notícias relativas a queimadas intensas e extensas no território do DF. As imagens de 10 de setembro e 25 de agosto eram imagens sem nuvens na região de interesse, obtidas pelo LandSat 8. Desse modo, obtiveram-se as cartas de temperatura das duas imagens a partir da banda 10.

Posteriormente, fez-se uma um busca de informações a respeito das regiões administrativas do DF, a fim de se ter uma noção geral dos lugares mais prováveis de apresentarem formações de ilhas de calor em seu território, e das possíveis causas das mesmas. As informações foram colhidas principalmente dos sites das administrações regionais e da Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (PDAD) realizada pela Codeplan (Companhia de Planejamento do Distrito Federal) nos anos de 2015 e 2016.

Assim, foi possível buscar imagens de 2016, quatro no total (16/04, 02/05, 21/07, 22/08), que não possuíam nuvens na área de interesse. Com essas quatro imagens e com o arquivo em formato *kml* dos subdistritos (que, em geral, coincide com as regiões administrativas) do DF, foi possível calcular-se as temperaturas médias, mínimas e máximas de cada subdistrito e, assim, comparar os resultados de cada imagem e distinguir as regiões de acordo com o seu comportamento.

Posteriormente, buscou-se fazer uma investigação histórica das temperaturas do DF, observando-se alguma variação notória. Para isso, escolheram-se quatro imagens de boa qualidade (*i.e.* sem nuvens) do DF com um espaçamento de cerca de 10 anos e aproximadamente na mesma época do ano. As datas obtidas foram: 26/05/1984, 30/05/1997, 24/06/2006 e 16/04/2016. Para cada uma dessas datas, foram obtidas cartas de temperatura e de uso do solo.

Junto com as informações obtidas anteriormente e com os dados históricos de temperatura foi possível, observar o processo de urbanização do setor Noroeste, que está incluído na região administrativa do Plano Piloto. Por se tratar de um bairro que vem sendo construído na última década e que ainda apresenta grande área de vegetação natural, escolheu-se o Noroeste para se fazer um estudo mais aprofundado. Desse modo, fez-se um polígono envolvendo a área do

setor Noroeste com uso do *Google Earth*®. Assim, foi possível recortar as bandas das quatro imagens (espaçadas de cerca de 10 anos) com esse polígono e, assim, calcular a temperatura e o NDVI para cada uma dessas datas, observando-se a variação histórica do bairro.

Com base nas informações colhidas de cada região administrativa e com as informações de temperatura dos subdistrito em cada imagem, identificaram-se ainda algumas regiões específicas que possuíam características distintas e até contrastantes. A primeira delas era a Asa Sul que apresentava, em geral, temperaturas mais baixas (o que é mostrado também por outras cartas de temperatura) que boa parte das outras regiões do DF. Destacou-se ainda a região que engloba Taguatinga e Ceilândia, como uma aglomeração urbana de elevados valores de temperatura em relação às outras regiões. Para essas duas regiões, bem como para o setor Noroeste, fizeram-se visitas de campo com o fim de se observar a tipologia urbanística/paisagística mais predominantes e identificar *in loco* possíveis causas do comportamento térmico de cada uma delas, registrando-se com fotografias os locais visitados, os quais foram também localizados utilizando-se o *Google Maps*®.

Por fim, as quatro imagens de 2016 foram utilizadas para se observar se havia alguma correlação entre a distribuição topográfica do DF e a formação de ilhas de calor. Para isso, foi necessário obter-se a grade retangular que descreve o relevo do DF. Com essa grade pronta, é possível obter uma visualização tridimensional do relevo, exagerando-se verticalmente as cotas de modo a facilitar a leitura. Com o modelo de relevo 3D, é possível sobrepor-se o plano temático de temperatura da imagem de cada data como uma textura, o que permite relacionar temperatura e relevo. Igualmente, foi possível fazer-se uma visualização 3D do plano (modelo numérico de terreno) de temperatura e sobrepor o plano temático de hipsometria como textura. Com a visualização tridimensional do plano de temperatura é possível ainda obter-se um perfil topográfico dessa variável e observar como se comporta a distribuição espacial de temperatura no DF, principalmente no que diz respeito aos picos de temperatura.

A metodologia aplicada neste projeto pode ser sumarizada pelo fluxograma da Figura 21.

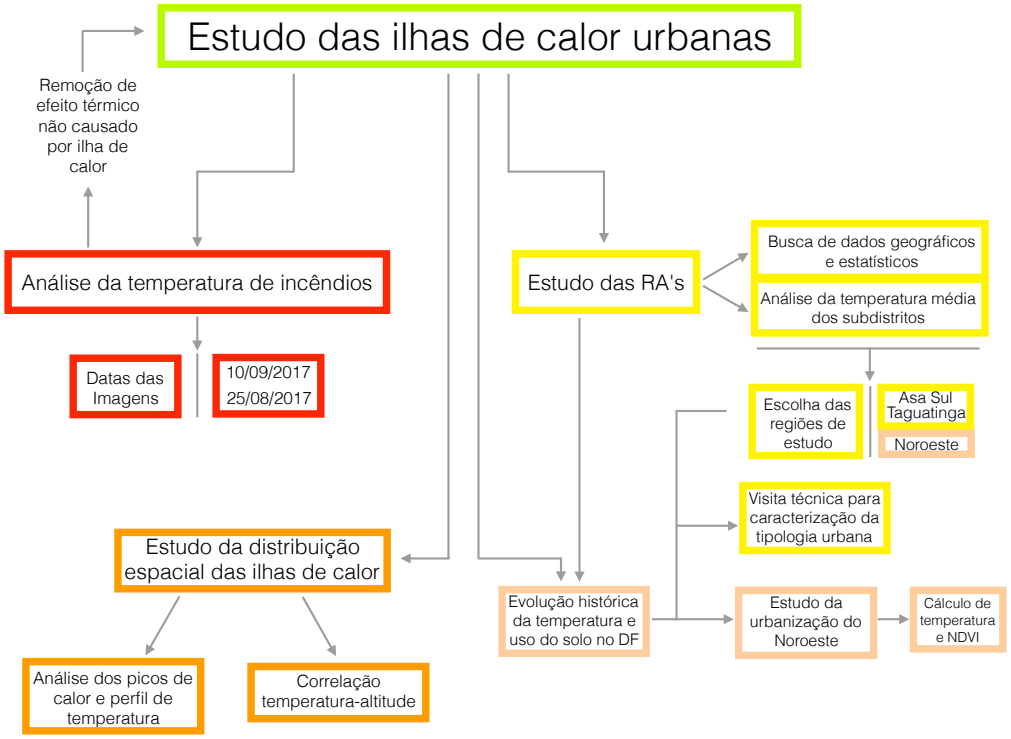


Figura 21: Fluxograma da metodologia.

6 RESULTADOS

6.1 QUEIMADAS

De janeiro a agosto de 2017, a área queimada por incêndios florestais no DF chegou a mais de 123 mil hectares, sendo 143,6% maior que a área queimada em 2016 [47]. Tal fenômeno fez com que as ocorrências de queimada chegassem a 54 por dia em julho de 2017, aumentando consideravelmente o trabalho do Corpo de Bombeiros Militares do DF para controlar tais sinistros.

Para se analisar esse fenômeno das queimadas recentes no DF, foram obtidas do site do USGS imagens do LandSat 8 das datas de 25/08/2017 e de 10/09/2017. Com essas imagens, calculou-se a temperatura de brilho de superfície, utilizando-se o procedimento descrito anteriormente e a Equação 5.1, com a banda 10. Os parâmetros M_L, A_L, K_1 e K_2 utilizados, todos fornecidos nos metadados das imagens, foram $3,3420 \cdot 10^{-4}$, $0,1$, 774,8853 e 1321,0789, respectivamente.

[47] Fonte: http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2016/09/incendios-florestais-no-df-destroem-area-de-123-mil-hectares-ate-agosto.html; acesso em 23/09/2017

Assim, depois de calculadas as temperaturas das imagens, obtendo-se um plano de informação do tipo Modelo Numérico de Terreno (que fornece os valores máximo e mínimo de temperatura), foi possível fatiá-las e associá-las a classes temáticas de temperatura, que permitem obter as temperaturas médias de todo o DF para cada imagem. Os dados das imagens dessas datas estão na Tabela 2.

Tabela 2: Dados das imagens do DF para análise de incêndios.

Data	Satélite/Sensor	Mínimo (^oC)	Máximo (^oC)	Médio (^oC)
25/08/2017	LandSat 8/TIRS	11,42	38,89	27,97
10/09/2017	LandSat 8/TIRS	12,33	61,12	33,02

Além de estarem em épocas distintas do ano em relação às imagens utilizadas para se avaliar a evolução histórica da temperatura das RA's no DF, as imagens utilizadas para análise de incêndio ajudam a explicar a presença de, em geral, temperaturas (nos valores médio e máximo) maiores das imagens utilizadas para análise de focos de incêndio em relação às imagens de análise geral do DF, devido à presença do fogo em si e de regiões de queimadas, como era de se esperar, sobretudo em meses de grande secura e elevadas temperaturas no DF. As queimadas são um dos tipos de cobertura do solo com maior temperatura média, segundo Borges (2017). Os planos temáticos de temperatura de brilho de superfície das imagens podem ser observados nas Figuras 22 e 23.

No dia 25 de agosto de 2017, observa-se que as temperaturas médias, apesar de estarem bem elevadas, ainda permitem se distinguir entre regiões mais frias e mais quentes de acordo com o uso do solo conhecido de certas regiões. Há ainda um contraste entre certas áreas e seus arredores, indicando a formação de ilhas de calor..

No dia 10 de setembro de 2017, porém, o contraste das regiões tipicamente urbanas com seus arredores desaparece, de modo que todo o solo se apresenta a elevadas temperaturas de maneira quase uniforme.

Ainda, pode-se ver nos planos temáticos de temperatura a presença de manchas de calor que chegam a valores maiores que 35^oC na imagem de agosto e maiores que 40^oC na de outubro. Pode-se notar também que essas imagens de elevadas temperaturas não coincidem com as regiões urbanas densamente povoadas que apresentam elevadas temperaturas devido ao fenômeno das ilhas de calor. Portanto, é razoável concluir, pela comparação com as imagens de uso do solo a serem analisadas (além das já obtidas em Borges, 2017) que se tratam de regiões com presença de queimadas ou de focos de incêndio propriamente ditos. Desse modo, é possível não confundir um fenômeno desconexo das ilhas de calor (que são o foco de estudo do presente trabalho) com essas áreas que apresentam elevados valores de temperatura, mas que provém de uma causa completamente distinta, mesmo que produza um efeito semelhante.

As duas imagens posteriores, porém, não apresentam um contraste tão grande entre diferentes regiões (especialmente a de outubro) de modo que torna-se difícil distinguir entre as RA's

e caracterizá-las tanto quantitativa quanto qualitativamente. A distinção qualitativa é feita com base na coleta de dados específicos sobre cada região e a diferenciação quantitativa, pela determinação de dados específicos de temperatura sobre as várias regiões. Isso é o que se apresenta nas próximas seções.

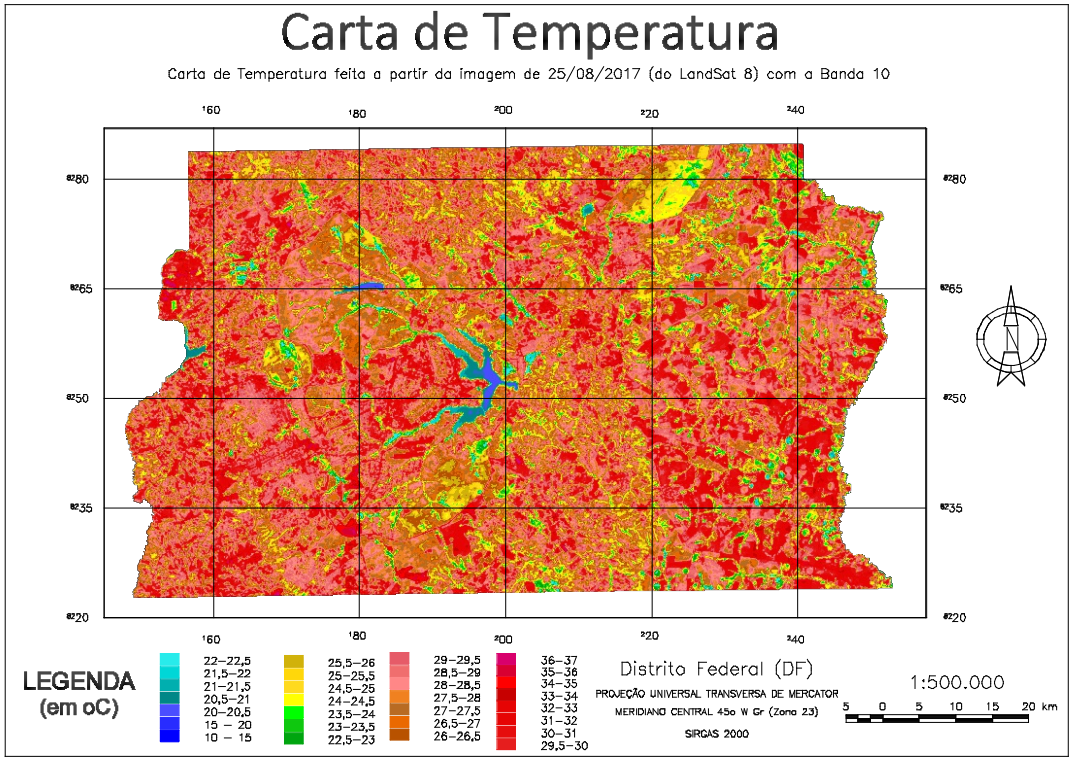


Figura 22: Carta de temperatura do DF de 25/08/2017.

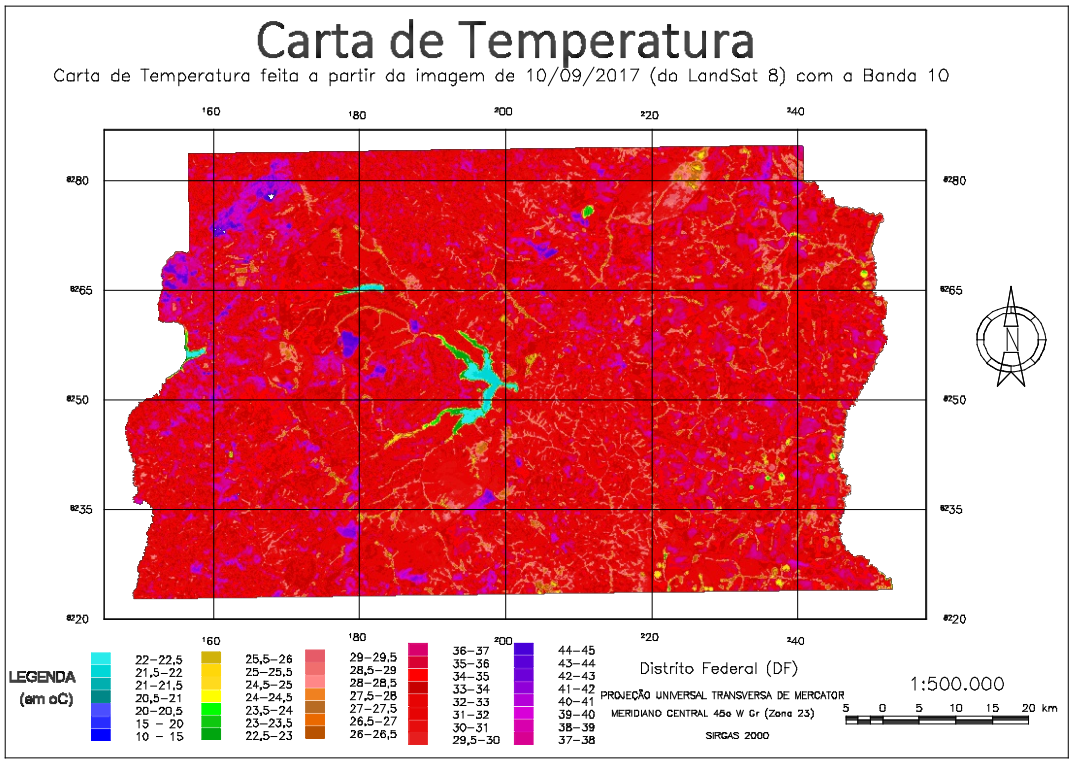


Figura 23: Carta de temperatura do DF de 10/09/2017.

6.2 AS REGIÕES ADMINISTRATIVAS DO DF

A seguir, segue um resumo sobre alguns dados relevantes sobre as Regiões Administrativas (RA's) do DF. Foram consultados, principalmente, os dados obtidos pela Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (PDAD) iniciada em 2015 e concluída em 05/12/2016 pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal (Codeplan). Os domicílios considerados foram os urbanos, e a renda per capita é dada em valores reais dos anos em que se estimou a população.

6.2.1 ÁGUAS CLARAS

O bairro de Águas Claras foi implementado legalmente em 16 de dezembro de 1992, com o fim de viabilizar o metrô como proposta racional de locomoção urbana e de expansão ordenada de Brasília, tendo sido projetado pelo arquiteto e urbanista Paulo Zimbres para fornecer um bairro com a mesma qualidade de vida do Plano Piloto, porém com moldes urbanísticos distintos.[48]

A RA é ainda o maior canteiro de obras do Brasil, tendo cerca de metade de sua área total

[48]Fonte: http://www.aguasclaras.df.gov.br/category/sobre-a-ra/informacoes/; acesso em 12/10/2017.

(que é de 808 hectares) reservada para áreas verdes.[49] O transporte público é feito principalmente pelo metrô e e pelo sistema de ônibus.

Em 2016, a estimativa populacional era de mais de 148 mil habitantes, com cerca de 52,5 mil domicílios, com uma renda per capita de 3.391,07 reais, segundo dados do PDAD de 2015/2016.

6.2.2 BRAZLÂNDIA

Brazlândia foi fundada em 10 de dezembro de 1964, por quatro famílias goianas, tendo uma área total de $474,83\ km^2$.[50] Segundo os dados do PDAD, a cidade tem uma população estimada (em 2015) de cerca de 52.287 habitantes, mais de 15 mil domicílios urbanos e renda per capita real de 983,13 reais. Das ruas regularizadas (90% do total), cerca de somente 23% possuem algum nível de arborização, enquanto para as não regularizadas esse número sobe para 4,44%.

6.2.3 CANDANGOLÂNDIA

A Candangolândia é uma região administrativa de 6,61 km^2 de área, contando com seis quadras residenciais distantes cerca de 12 km do centro de Brasília.[51]

Conforme as informações do PDAD, a estimativa populacional para 2015 é de 16.848 habitantes, com mais de 5 mil domicílios urbanos e uma renda per capita real de R$ 1.460,98. Dos terrenos ocupados de maneira regularizada, quase todos possuem ruas asfaltadas de acesso, ao passo que 70% das ruas dos lotes não regularizados (que perfazem 2,6% do total) possuem o mesmo tipo de infraestrutura; a fração de ruas arborizadas porém chega a cerca de 47% entre os lotes regularizados e mais de 38% nos irregulares.

6.2.4 CEILÂNDIA

A região administrativa da Ceilândia foi fundada em 26 de março de 1971, com o objetivo de erradicar invasões próximas ao centro da capital, daí o fato de seu nome derivar de *Comissão de Erradicação de Imigrantes*.[52]

Conforme dados do PDAD, a população estimada em 2015 era de mais de 489 mil moradores, distribuídos em mais de 142 mil domicílios urbanos, com uma renda per capita real de 915,81 reais. Entre as ruas de terrenos regularizados (81% do total), mais de 96% são asfaltadas e cerca de 87,52% das não regularizadas tem a mesma infraestrutura.

[49] *Ibid idem.*
[50] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Brazlândia; acesso em 12/10/2017.
[51] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Candangolândia; acesso em 12/10/2017.
[52] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ceilândia; acesso em 12/10/2017.

6.2.5 CRUZEIRO

O Cruzeiro foi fundado há 57 anos, tendo uma área de cerca de 8,9 km^2 [53]. Segundo o PDAD, a região possui uma população de cerca de 33.539 habitantes para 2016, vivendo em mais de 10 mil domicílios e com uma renda per capita real de mais de R$2.700. O bairro tem ainda 99% das suas ruas asfaltadas e cerca de 67% arborizadas.

6.2.6 ESTRUTURAL

A região da Cidade Estrutural foi formada pelas invasões de catadores de lixo próximo ao aterro sanitário do Distrito Federal, tendo recebido o seu nome devido a rodovia distrital que passa em frente à mesma.[54]

Segundo o PDAD, a projeção da população para 2015 era de mais de 39 mil habitantes, em quase 10 mil domicílios, com renda per capita real de 521,80 reais. Entre os domicílios regularizados (apenas 3% do total), cerca de 61% são servidos por ruas asfaltadas, enquanto que para os irregulares essa taxa cai para cerca de 53%. Contudo, os lotes não regularizados tem quase o dobro de ruas arborizadas proporcionalmente em relação aos regularizados (15,20% contra 7,69%).

6.2.7 FERCAL

A região da Fercal foi fundada há 61 anos, apresentando atualmente em seu território duas grandes fábricas brasileiras de cimento (Votorantim e Ciplan).[55] Segundo dados do PDAD, sua população era de quase 9 mil habitantes em 2015, vivendo em mais de 2 mil domicílios com renda per capita real de 625,64 reais. Quase metade de suas ruas são asfaltadas, sendo que dessas 21% das regularizadas (que são 36% do total de ruas) possuem arborização, enquanto que para as regiões não regularizadas esse valor cai para apenas 12,85%.

6.2.8 GAMA

A região administrativa do Gama foi fundada em 12 de outubro de 1960, contando com uma área total de mais de 276 km^2. [56] Segundo o PDAD, a população estimada era de mais de 141 mil habitantes em 2015, vivendo em mais de 43 mil domicílios, com uma renda per capita real

[53]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Cruzeiro_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017
[54]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Cidade_Estrutural; acesso em 12/10/2017
[55]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Cidade_Estrutural; acesso em 12/10/2017.
[56]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Gama_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017.

de cerca de 1.396,93 reais. Dos lotes regularizados, mais de 96% tem ruas alfastadas de acesso e mais de 30% ruas arborizadas, enquanto que os não regularizados - que representam cerca de 5% do total - mais de 36% tem ruas asfaltadas e cerca de 8% tem ruas arborizadas.

6.2.9 GUARÁ

A região administrativa do Guará foi fundada há cerca de 48 anos e possui atualmente uma área de cerca de 21 km^2. [57]

Segundo o PDAD, há na região mais de 46 mil domicílios, nos quais habitam cerca de 132 mil pessoas (estimativa de 2015), com uma renda média per capita real de quase 2.700 reais. Entre os lotes regularizados (que representam cerca de 97% de todos os lotes), quase todos possuem ruas asfaltadas de acesso e 56,32% dessas ruas são arborizadas; já para os lotes irregulares, os valores caem para 95% e 15%, respectivamente.

6.2.10 ITAPOÃ

A região do Itapoã é uma ocupação de uma região que anteriormente pertencia à Sobradinho e era próxima ao Paranoá. [58] Conforme o PDAD, a população estimada para 2015 era de mais de 68 mil moradores, habitando quase 18 mil domicílios, com uma renda per capita real de 702 reais. Cerca de 95% das suas ruas são asfaltadas; de todas elas, as de regiões não regularizadas apresentam arborização a taxas de 10%, enquanto que as regularizadas (34% do total) com um pouco mais de 1 décimo disso.

6.2.11 JARDIM BOTÂNICO

O Jardim Botânico foi criado legalmente em 2004, sendo composto basicamente por um conjunto de condomínios fechados. [59] Segundo o PDAD, a população estimada para 2016 é de mais de 27 mil moradores, vivendo em 8.172 domicílios, tendo uma renda per capita real de quase 4.000 reais. Cerca de 84% das suas ruas são asfaltadas, sendo que das regularizadas (que são cerca de 16% do total) quase 48% são arborizadas enquanto que nas irregulares essa taxa vai para cerca de 67%.

[57] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Guará_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017.
[58] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Itapoã_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017
[59] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Jardim_Botânico_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017.

6.2.12 NÚCLEO BANDEIRANTE

O núcleo Bandeirante foi a primeira ocupação dos candangos, há cerca de 60 anos atrás, tendo atualmente uma área de 80,43 km^2.[60] Conforme os dados do PDAD, a população estimada em 2015 era de cerca de 25 mil moradores, distribuídos em cerca de mais de 8 mil domicílios, tendo uma renda per capita real de mais de 1.800 reais. Quase todos os lotes regularizados possuem ruas asfaltadas de acesso, ao passo que 68% dessas são arborizadas. Os lotes não regularizados, que contam 6% do total, tem apenas uma taxa de 53,33% de pavimentação e de arborização.

6.2.13 LAGO NORTE

O Lago Norte é um bairro predominantemente residencial, sendo situado em uma península do lago Paranoá, tendo atualmente mais de 66 km^2 de área[61]. Conforme o PDAD, a população em 2016 era estimada em cerca de mais de 37 mil moradores, vivendo em mais de 12 mil residências, com uma renda per capita real de quase 5.000 reais. Os lotes regularizados (que representam 85% do total), tem ruas com taxas de pavimentação e arborização de cerca de 96 e 89% respectivamente; para os lotes irregulares, as taxas caem para cerca de 32 e 44%.

6.2.14 LAGO SUL

O Lago Sul foi criado em 1994, como um bairro comercial nobre com pequenos comércios espalhados pela região; atualmente, possui uma área de cerca de 183 km^2.[62] De acordo com os dados do PDAD, a estimativa populacional era de 29.346 habitantes para o ano de 2016, em que a renda per capita real ultrapassava 8 mil reais, e os moradores estavam distribuídos em mais de 9 mil domicílios. Das ruas de acesso aos domicílios, quase todas são asfaltadas e 67,40% possuem arborização.

6.2.15 PARANOÁ

O Paranoá foi fundado há 52 anos, tendo atualmente uma zona comercial forte, embora não tenha uma zona industrial. A área total da região é de mais de 853 km^2.[63] Conforme o PDAD, há cerca de 13,3 mil domicílios habitados por mais de 48 mil moradores (estimativa de 2015),

[60]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Núcleo_Bandeirante; acesso em 12/10/2017.
[61]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lago_Norte; acesso em 12/10/2017.
[62]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lago_Sul; acesso em 12/10/2017.
[63]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Paranoá; acesso em 12/10/2017.

com uma renda per capita real de quase 900 reais. Mais de 95% de todas as ruas são asfaltas e mais de 42% são arborizadas.

6.2.16 *PARK WAY*

O *Park Way* foi fundado oficialmente em Dezembro de 2003, contando com uma área de 79 km^2.[64] Conforme o PDAD, a população estimada em 2016 é de quase 20 mil pessoas, habitando em quase 6 mil domicílios, com uma renda real per capita de mais de 5 mil reais. Os lotes regularizados, que representam 9% do total, tem ruas asfaltadas em mais de 93% das vezes e ruas arborizadas em cerca de 84%; já para as regiões não regularizadas, esses valores caem para cerca de 66 e 55%, respectivamente.

6.2.17 PLANALTINA

Planaltina foi fundada oficialmente em 1859 (incluindo a porção localizada no estado de Goiás), tendo já sido ocupada no século anterior por bandeirantes goianos na busca de ouro e pedras preciosas; atualmente a região do DF possui mais de 1.500 km^2 de área [65]. O PDAD estima que, em 2015, a população da região era de 189 mil habitantes, distribuídos em mais de 54 mil domicílios, tendo uma renda per capita real de 933,80 reais. Mais de 93% de suas ruas são asfaltadas; entre as de domicílios regulares (que são 69% do total), mais de 32% são arborizadas; já para os lotes irregulares, a taxa cai para 23,24%.

6.2.18 PLANO PILOTO

A região do Plano Piloto engloba a Asa Norte, a Asa Sul, os setores Militar Urbano, de Clubes, de Garagens e Oficinas, de Indústrias Gráficas, a Área de Camping, o Eixo Monumental, a Esplanada dos Ministérios, os Setores de Embaixadas Norte e Sul, a Vila Planalto, a Vila Telebrasília, a Granja do Torto, o Setor de Áreas Isoladas Norte, as sedes dos três poderes da República e o setor Noroeste.[66] A população estimada pelo PDAD para o ano de 2016 é de mais de 220 mil moradores, distribuídos em mais de 83 mil domicílios, com renda per capita real de 5.569,46 reais. As taxas de ruas asfaltadas ultrapassam 90% em todos os subsetores do Plano Piloto, e as arborizadas são mais de 73% do total.

[64] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Park_Way; acesso em 12/10/2017.
[65] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Planaltina_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017.
[66] Fonte: http://www.planopiloto.df.gov.br/category/sobre-a-ra/informacoes/; acesso em 12/10/2017.

6.2.19 RECANTO DAS EMAS

A região foi criada em julho de 1993, com o fim de atender ao programa de assentamento e erradicar as invasões em Brasília, sendo constituída de 59 quadras e tendo uma área de 101,22 km^2.[67] Segundo o PDAD, a população em 2015 seria de 145.304 habitantes distribuídos em mais de 41 mil domicílios, tendo-se uma renda per capita real de 803,92 reais. Para os lotes regularizados, cerca de 98% tem ruas asfaltadas, sendo apenas 28% das mesmas arborizadas. Para os irregulares, as taxas caem para 51,13% para pavimentação, mas sobe para 37,78% para arborização.

6.2.20 RIACHO FUNDO I E II

O Riacho Fundo foi criado há 27 anos e tem uma área de mais de 56 km^2, tendo sido dividido em Riacho Fundo I e Riacho Fundo II em 1994, ao passo que só em 2003 foi criada uma nova administração regional.[68]

Segundo o PDAD, o Riacho Fundo I possui uma população de cerca de 40 mil habitantes em estimativa para 2015, morando em quase 13 mil domicílios, tendo uma renda per capita real de 1.624,19 reais. Entre as ruas de residências regularizadas (95% do total), 97,89% são asfaltadas e 51,48% são arborizadas. Para os lotes irregulares, os valores caem para 65,38% e 30,77%, respectivamente.

Já para o Riacho Fundo II, tem-se uma população de mais de 51 mil pessoas com renda per capita real de 930,37 reais, habitando cerca de 15 mil domicílios. Praticamente, todas as ruas são asfaltadas; para a arborização, a taxa é de 35,37% para lotes regularizados (92% do total), e 40,48% dos irregulares.

6.2.21 SAMAMBAIA

Samambaia é uma região administrativa fundada em 1989, englobando uma área de 102,6 km^2, tendo sido uma das primeiras regiões a serem criadas no DF com planejamento urbano e servindo de modelo para outras que ainda seriam criadas.[69] Segundo o PDAD, a população estimada em 2015 é de 254.439 habitantes, com renda per capita real de 1.029 reais, habitando em mais de 68 mil domicílios. As ruas com asfalto são cerca de 98,77% e as arborizadas cerca de 21,88%, contando as que estão próximas aos domicílios urbanos.

[67] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Recanto_das_Emas; acesso em 12/10/2017.
[68] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Riacho_Fundo; acesso em 12/10/2017.
[69] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Samambaia_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017.

6.2.22 SANTA MARIA

A região de Santa Maria é um núcleo rural, que permaneceu como área rural do Gama até 1992, contando atualmente com uma área de 215,86 km^2.[70] Segundo o PDAD, habitavam a região em 2015 mais de 125 mil pessoas, em cerca de 34 mil domicílios, tendo uma renda per capita real de 887,63 reais. Entre as ruas de acesso a lotes regulares, 97,96% tem rua asfaltada e 22,82% são arborizadas; já para os lotes irregulares (10% do total), os índices são de 42,62% e 13,11% respectivamente.

6.2.23 SÃO SEBASTIÃO

A região de São Sebastião foi ocupada a partir de 1957, quando várias olarias se instalaram na região, a qual possui hoje uma área de 383,71 km^2.[71] Conforme o PDAD, a população estimada para o ano de 2016 é de cerca de 100 mil moradores, com 29 mil domicílios e renda per capita real de 985 reais. Dentre as ruas da região, mais de 93% são asfaltadas e mais de 31% tem algum tipo de arborização.

6.2.24 SIA

O SIA (Setor de Indústria e Abastecimento) foi fundado em 2005, tendo uma área de mais de 45 km^2 e contendo um grande número de concessionárias de automóveis, postos de combustíveis e empresas de material de construção.[72] Segundo o PDAD, a população estimada em 2016 é de 1988 pessoas, em 548 domicílios, com uma renda per capita real de mais de 1.700 reais. Mais de 98% das ruas possuem pavimentação asfáltica, mas somente 32,24% são arborizadas.

6.2.25 SOBRADINHO I E II

Sobradinho foi fundado em 1960, sendo depois transformado em uma área tipicamente rural, que, após a fundação de Brasília, acabou por se urbanizar, atingindo uma área de quase 290 km^2.[73] Devido à migração interna de alguns moradores, criou-se em 2004, a região administrativa de Sobradinho II, dentro do antigo território de Sobradinho, que passou a ser conhecido

[70]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Santa_Maria_(Distrito_Federal); acesso em 12/10/2017.
[71]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/São_Sebastião; acesso em 12/10/2017.
[72]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Setor_de_Indústria_e_Abastecimento; acesso em 12/10/2017.
[73]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sobradinho; acesso em 12/10/2017.

como Sobradinho I.[74]

Conforme os dados do PDAD, a população estimada de Sobradinho I para 2015 era de mais de 68 mil moradores, habitando cerca de 20 mil residências, com renda per capita real de 1.775,79 reais. Os lotes não regularizados representam cerca de 9% do total, sendo que as ruas de acesso aos mesmos possuem pavimentação asfáltica em 86,68% dos casos e arborização em 13,33% das vezes; já para os lotes regulares, os índices vão para 95,47% e 57,34%, respectivamente.

Já Sobradinho II tem uma população de cerca de 100 mil habitantes (estimada para 2015), uma quantidade de 29 mil domicílios urbanos, e uma renda per capita real de 1.732,52 reais. As ruas de lotes irregulares representam 67% do total, sendo que destas 87,52% são asfaltadas, e 28,49% são arborizadas; para ruas de lotes regulares, os índices são de 94,27% e 19,85%, respectivamente.

6.2.26 SUDOESTE E OCTOGONAL

A região administrativa que engloba os bairros do Sudoeste e da Octogonal foi criada em 1989 como parte do projeto "Brasília Revisitada"do urbanista Lúcio Costa, tendo sido tombada pelo patrimônio histórico.[75] De acordo com os dados do PDAD, a população estimada em 2016 é de 53.262 habitantes, distribuídos em mais de 22 mil domicílios, com uma renda per capita real de 6.589,90 reais. Das ruas de acesso aos domicílios, quase todas são asfaltadas e 97% são arborizadas.

6.2.27 VARJÃO

Com uma área de 1,5 km^2, o Varjão é uma região fundada por lei em maio de 2003, quando ainda era considerado como uma parte do Lago Norte.[76] De acordo com o PDAD, a população estimada para 2015 era de 9.215 habitantes, com renda per capita real de 627,81 reais, habitando quase 2.500 domicílios. Os lotes irregulares representam cerca de 6,21% do total, sendo que as ruas que dão acesso a esses lotes tem pavimentação asfáltica em 96,77% dos casos e arborização em 29,03%; para os lotes regulares, as taxas são de 99,15% e 21,15%, respectivamente.

6.2.28 VICENTE PIRES

[74]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sobradinho_II; acesso em 12/10/2017.
[75]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sudoeste/Octogonal; acesso em 12/10/2017.
[76]Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Varjão; acesso em 12/10/2017.

A região de Vicente Pires pertencia à Taguatinga até o ano de 2006, quando foi emancipada com uma administração própria, com jurisdição sobre os setores Habitacional Vicente Pires, Habitacional Samambaia, Habitacional São José e Habitacional Cana-do-Reino.[77] Conforme o PDAD, a população estimada para 2016 era de 72.879 moradores, vivendo em mais de 20 mil domicílios e tendo uma renda per capita real de R$2.757,51. Dentre as ruas de acesso aos domicílios, 88,11% são asfaltadas e 19,52% possuem algum tipo de arborização.

6.2.29 TAGUATINGA

A região de Taguatinga foi fundada em 1958, mas reconhecida legalmente somente em 1964, de modo a abranger atualmente uma área de 121,34 km^2.[78] Segundo o PDAD, a população estimada para 2016 é de mais de 220 mil pessoas, com renda per capita real de 1.998,14 reais, habitando em mais de 69 mil domicílios. As ruas de acesso aos domicílios em lotes regularizados tem pavimentação asfáltica em 98,63% dos casos e arborização em 14% das vezes; para os lotes irregulares, que perfazem 2,40% de todos os lotes, tem-se taxas de cerca de 63 e 22%.

É fácil notar, com as informações apresentadas sobre as várias regiões administrativas, que os equipamentos urbanos e as vias de acesso (com pavimentação asfáltica) são mais frequentes em lotes/áreas onde há regularização, e que os lotes regularizados também apresentam uma boa fração de arborização, principalmente quando comparados às áreas irregulares. Contudo, é mais comum que uma área apresente ruas de acesso com pavimento asfáltico do que arborização, principalmente se essas ruas são de áreas irregulares. Embora essas informações sejam úteis na caracterização da tipologia urbana das RA's do DF e indiquem a chance de uma determinada área apresentar ilhas de calor, elas, por si só, são insuficientes para mostrar definitivamente a distribuição de temperaturas, quando dissociadas da análise das cartas de temperatura das regiões do DF.

6.3 TEMPERATURA DAS RA's

Para se compreender a variação de temperatura no DF ao longo de suas Regiões Administrativas, obteve-se, inicialmente, a temperatura de brilho de superfície da imagem de 16/04/2016 (do LandSat 8) com o *software* SPRING®, conforme procedimento já descrito. Essa foi a primeira imagem considerada pois a mesma já havia sido utilizada em trabalhos anteriores (BORGES, 2017).

Uma vez obtido o plano de informação de temperatura no formato de modelo numérico

[77] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Vicente_Pires; acesso em 12/10/2017.
[78] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Taguatinga; acesso em 12/10/2017.

de terreno (MNT), o mesmo foi recortado em cada subdistrito. As regiões utilizadas para o recorte do mapa do DF foram as seguintes: Brazlândia, Candangolândia, Ceilândia, Cruzeiro (abrangendo ainda Sudoeste e Octogonal), Gama, Guará (abrangendo ainda a Estrutural e o SIA), Lago Norte (incluindo também o Varjão), Lago Sul, Paranoá, *Park Way* (incluindo ainda Águas Claras e o Núcleo Bandeirante), Planaltina, Plano Piloto, Recanto das Emas, Riacho Fundo (incluindo Riacho Fundo I e II), Samambaia, Santa Maria, São Sebastião (incluindo ainda o Jardim Botânico), Sobradinho (incluindo Sobradinho I e II, Fercal e Itapoã) e Taguatinga (abrangendo ainda Vicente Pires). Conforme já citado, essas regiões foram dadas nos mapas de subdistritos obtidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) obtidas no censo de 2010. Na Figura 24, há uma representação em carta dos subdistritos, que equivalem aproximadamente às regiões administrativas.

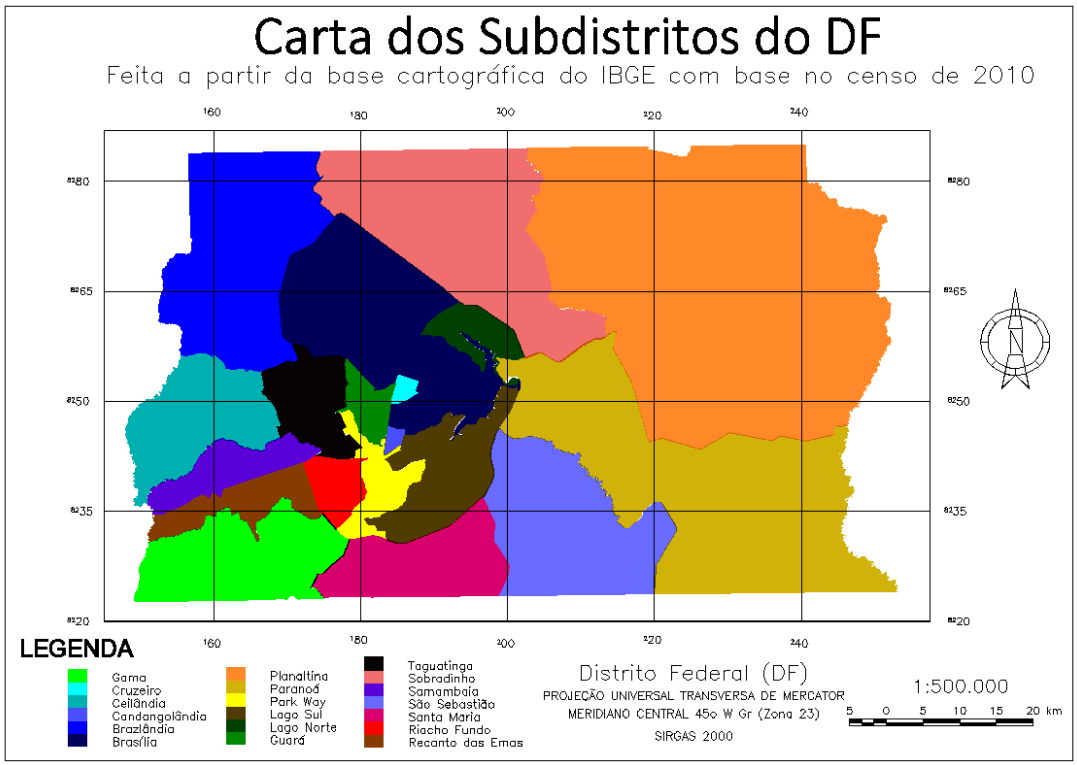


Figura 24: Mapa dos subdistritos do DF.

Uma vez obtidos os planos de informação de cada subdistrito, estes foram fatiados para um plano temático com as seguintes classes de temperatura (dadas em ^oC): menor que 0 , 0 a 10, 10 a 15, 15 a 20, 20 a 21, 21 a 22, 22 a 23, 23 a 24, 24 a 25, 25 a 26, 26 a 27, 27 a 28, 28 a 29, 29 a 30, 30 a 35, 35 a 40, e > 40.

Fazendo-se uma medida de classes de cada região, é possível calcular a temperatura média com uma média ponderada da temperatura intermediária de cada classe (que é a média aritmética simples dos extremos) pela área de cada classe. Igualmente, é possível obter os valores máximos e mínimos de temperatura em cada região, a partir dos planos (recortados) em MNT. Os resultados desses procedimentos estão descritos na Tabela 3 e na Figura 25, em que se con-

feccionou uma carta de temperatura média por cada região administrativa (RA) na referida data.

Tabela 3: Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 16/04/2016 do LandSat 8.

Região Administrativa	Média (^oC)	Mínima (^oC)	Máxima (^oC)
Brazlândia	27,45	22,63	34,77
Candangolândia	27,98	23,56	33,55
Ceilândia	28,53	22,81	37,16
Cruzeiro	30,92	25,67	32,95
Gama	28,72	23,46	35,82
Guará	30,34	23,39	36,25
Lago Norte	28,69	24,30	33,16
Lago Sul	27,12	23,19	34,67
Paranoá	28,61	23,05	37,44
Park Way	28,88	23,20	33,35
Planaltina	28,58	21,17	38,29
Plano Piloto	**27,43**	**22,03**	**35,88**
Recanto das Emas	28,76	23,93	35,39
Riacho Fundo	28,52	23,19	34,63
Samambaia	29,22	23,17	36,27
Santa Maria	27,99	23,49	35,70
São Sebastião	28,05	22,40	35,45
Sobradinho	28,11	23,73	40,70
Taguatinga	**29,09**	**23,12**	**34,58**

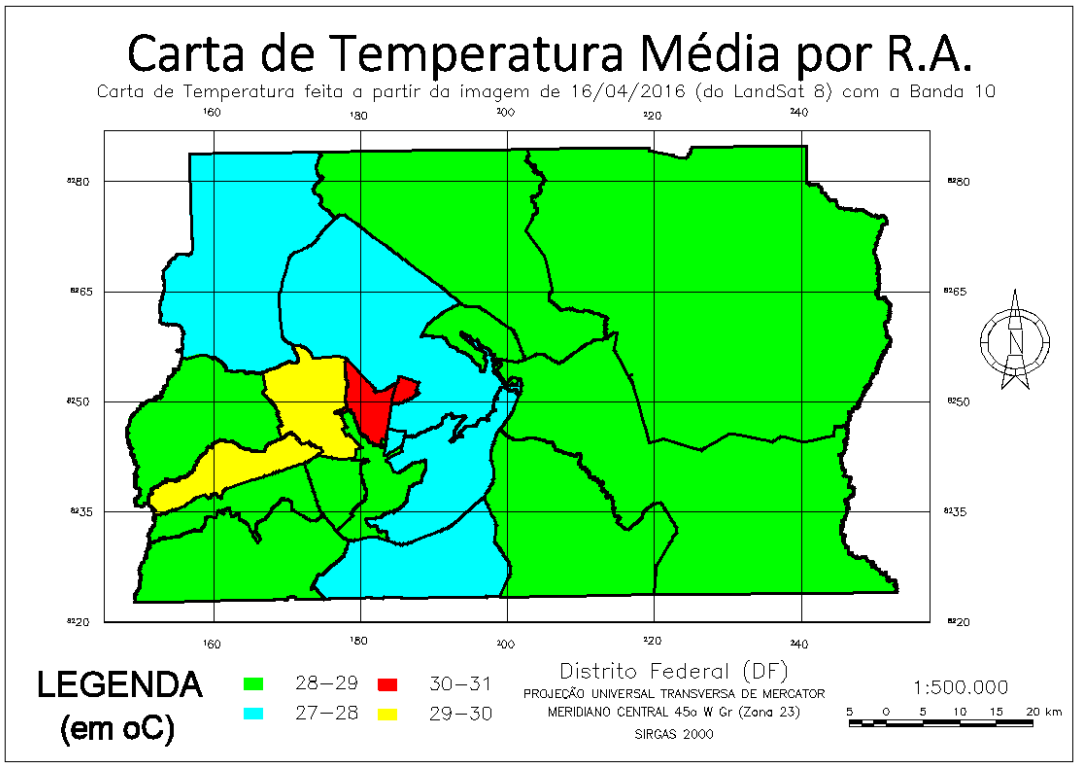


Figura 25: Carta de temperatura média por RA do DF em 16/04/2016.

Observa-se que há um corredor central com temperaturas mais amenas um pouco deslocado para o oeste do mapa do DF, que equivalem à regiões urbanas mais arborizadas ou a regiões com vegetação natural, mas, à volta disso, há ainda regiões agrícolas mais quentes (a leste) e regiões urbanas mais quentes a oeste. Destaca-se, em especial, as regiões do Guará, Taguatinga e Sudoeste.

Posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado para as imagens das datas de 22/08, 21/07 e 02/05.[79] Então, fez-se uma média das temperaturas das regiões administrativas desses quatro anos, bem como calculou-se os valores máximo e mínimo das temperaturas de cada região considerando os dados de todos os anos. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 26, 27, 28 e 29, assim como nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

[79] A única diferença foi que nessas imagens seguiu-se, no fatiamento, a divisão de classes mencionada na seção de *Métodos*.

Tabela 4: Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 22/08/2016 do LandSat 8.

Região Administrativa	Média (^oC)	Mínima (^oC)	Máxima (^oC)
Brazlândia	25,14	18,11	35,36
Candangolândia	22,85	18,41	28,51
Ceilândia	24,17	17,44	32,76
Cruzeiro	25,24	21,32	29,82
Gama	22,89	16,77	32,76
Guará	25,53	18,60	32,61
Lago Norte	23,85	18,70	31,63
Lago Sul	22,96	18,00	31,76
Paranoá	25,06	17,55	33,07
Park Way	24,76	18,61	39,45
Planaltina	25,15	8,73	34,99
Plano Piloto	**23,55**	**17,98**	**33,61**
Recanto das Emas	24,22	18,27	32,72
Riacho Fundo	25,43	18,70	33,18
Samabaia	24,81	18,79	32,81
Santa Maria	23,56	17,59	32,15
São Sebastião	23,94	17,72	34,82
Sobradinho	24,94	18,15	34,77
Taguatinga	**24,52**	**18,06**	**32,71**

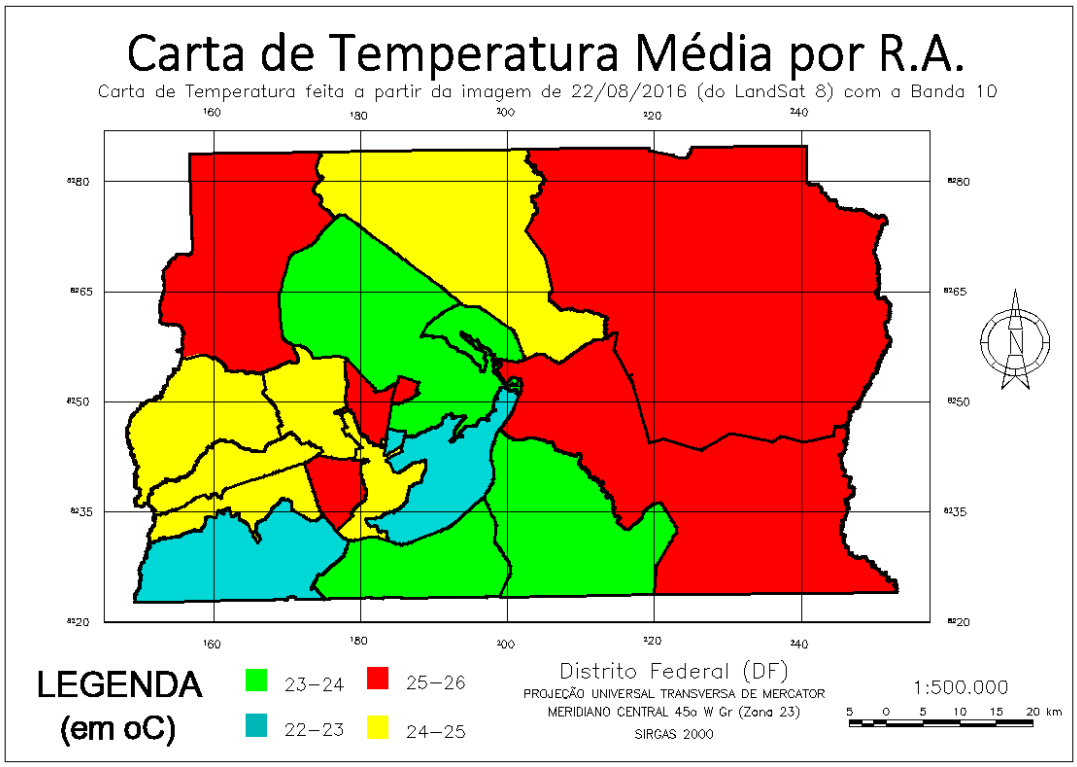


Figura 26: Carta de temperatura média por RA do DF em 22/08/2016.

Nessa imagem de agosto, tem-se uma maior heterogeneidade das regiões em relação à imagem anterior de abril. Em especial, as regiões agrícolas (a leste, provavelmente em tempos de solo exposto) estão mais quentes que boa parte das regiões urbanas. Porém, ainda se destacam, por suas elevadas temperaturas, as regiões de Guará, Cruzeiro e Riacho Fundo.

Tabela 5: Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 21/07/2016 do LandSat 8.

Região Administrativa	Média (^oC)	Mínima (^oC)	Máxima (^oC)
Brazlândia	28,08	20,90	37,57
Candangolândia	26,56	22,20	31,10
Ceilândia	27,70	21,02	36,95
Cruzeiro	27,94	24,39	31,56
Gama	27,54	22,47	37,31
Guará	28,50	22,32	34,44
Lago Norte	26,43	21,44	33,33
Lago Sul	26,12	21,72	34,60
Paranoá	28,24	21,05	35,62
Park Way	27,85	21,51	34,30
Planaltina	28,21	11,49	39,80
Plano Piloto	**26,42**	**19,78**	**35,96**
Recanto das Emas	28,04	23,10	35,24
Riacho Fundo	28,78	22,05	36,75
Samambaia	28,60	22,10	36,54
Santa Maria	27,12	21,73	40,23
São Sebastião	26,90	21,00	37,63
Sobradinho	27,89	21,80	38,23
Taguatinga	**27,84**	**22,22**	**34,72**

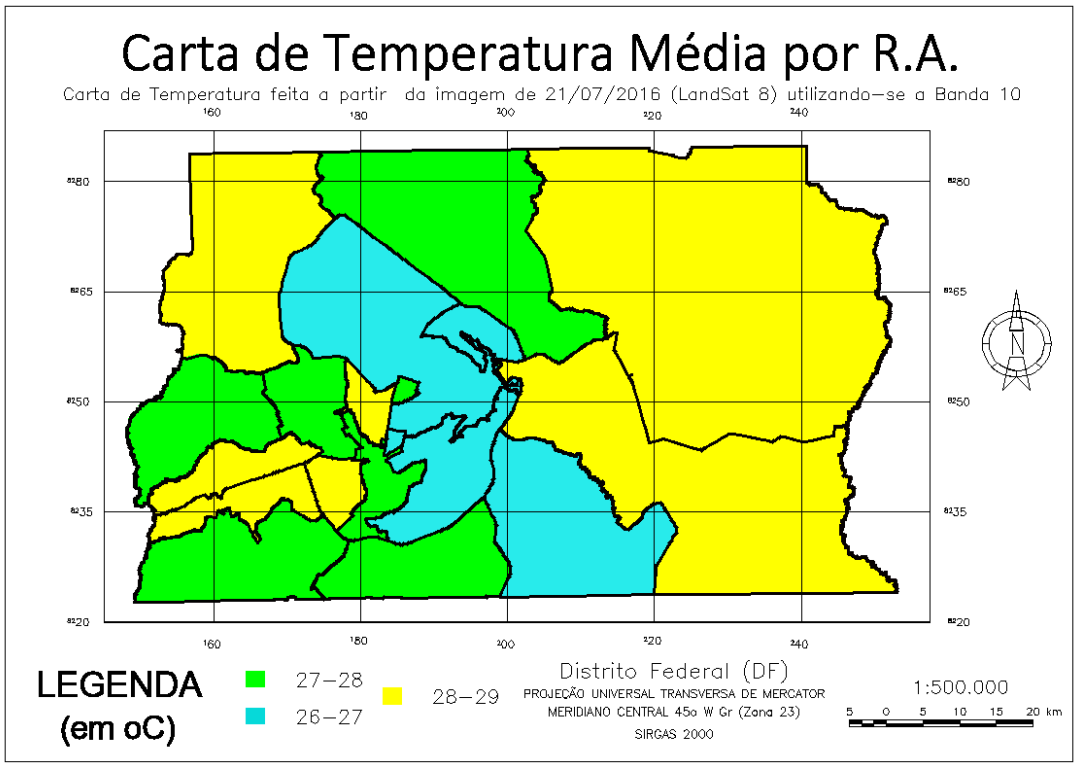


Figura 27: Carta de temperatura média por RA do DF em 21/07/2016.

Nessa imagem de julho, vê-se novamente uma distinção clara entre regiões urbanas centrais e as mais periféricas, essas últimas com temperaturas mais elevadas; destacam-se, por serem mais quentes, Guará, Samambaia e Recanto das Emas.

Tabela 6: Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF da imagem da data de 02/05/2016 do LandSat 8.

Região Administrativa	Média (^oC)	Mínima (^oC)	Máxima (^oC)
Brazlândia	25,49	21,18	31,53
Candangolândia	25,89	22,24	31,13
Ceilândia	26,52	20,97	32,56
Cruzeiro	27,17	23,68	29,46
Gama	26,93	22,18	33,52
Guará	27,18	21,56	34,67
Lago Norte	26,27	22,59	33,18
Lago Sul	25,08	21,45	31,61
Paranoá	26,16	21,24	33,62
Park Way	26,34	22,23	30,83
Planaltina	25,64	17,37	34,06
Plano Piloto	**25,32**	**20,41**	**33,37**
Recanto das Emas	27,00	22,44	33,16
Riacho Fundo	26,59	22,08	31,57
Samambaia	27,42	22,38	33,10
Santa Maria	25,62	21,65	33,34
São Sebastião	25,56	20,99	35,83
Sobradinho	25,85	22,09	36,50
Taguatinga	**26,24**	**21,44**	**31,54**

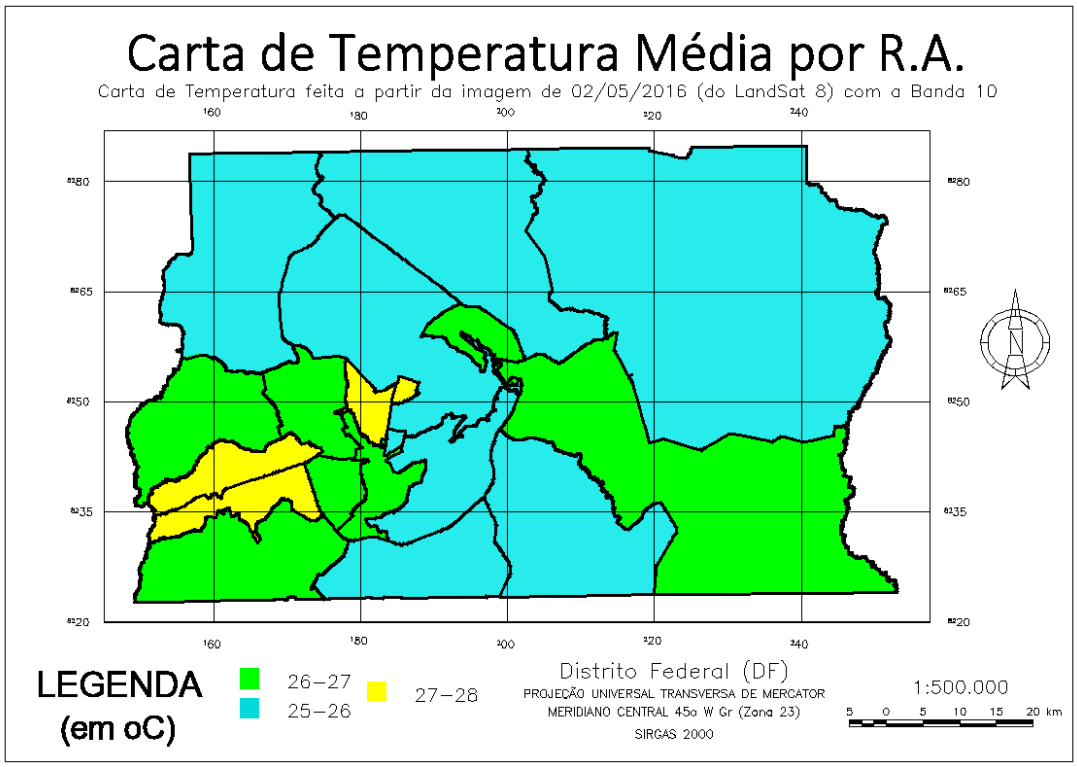


Figura 28: Carta de temperatura média por RA do DF em 02/05/2016.

O comportamento das regiões nessa nova data em maio mostra uma maior homogeneidade de temperatura, principalmente nas regiões urbanas centrais e nas regiões agrícolas, mas permanecem a concentração de temperaturas mais elevadas nas regiões urbanas ao sudoeste do mapa.

Tabela 7: Temperaturas Médias, Mínimas e Máximas das Regiões Administrativas do DF das imagens da data de 16/04, 02/05, 21/07, 22/08 do LandSat 8.

Região Administrativa	Média (^oC)	Mínima (^oC)	Máxima (^oC)
Brazlândia	26,54	18,11	37,57
Candangolândia	25,82	18,41	33,55
Ceilândia	26,73	17,44	37,16
Cruzeiro	27,82	21,32	32,95
Gama	26,52	16,77	37,31
Guará	27,89	18,60	36,25
Lago Norte	26,31	18,70	33,33
Lago Sul	25,32	18,00	34,67
Paranoá	27,02	17,55	37,44
Park Way	26,96	18,61	39,45
Planaltina	26,90	8,73	39,80
Plano Piloto	**25,68**	**17,98**	**35,96**
Recanto das Emas	27,00	18,27	35,39
Riacho Fundo	27,33	18,70	36,75
Samambaia	27,51	18,79	36,54
Santa Maria	26,07	17,59	40,23
São Sebastião	26,11	17,72	37,63
Sobradinho	26,70	18,15	40,70
Taguatinga	**26,92**	**18,06**	**34,72**

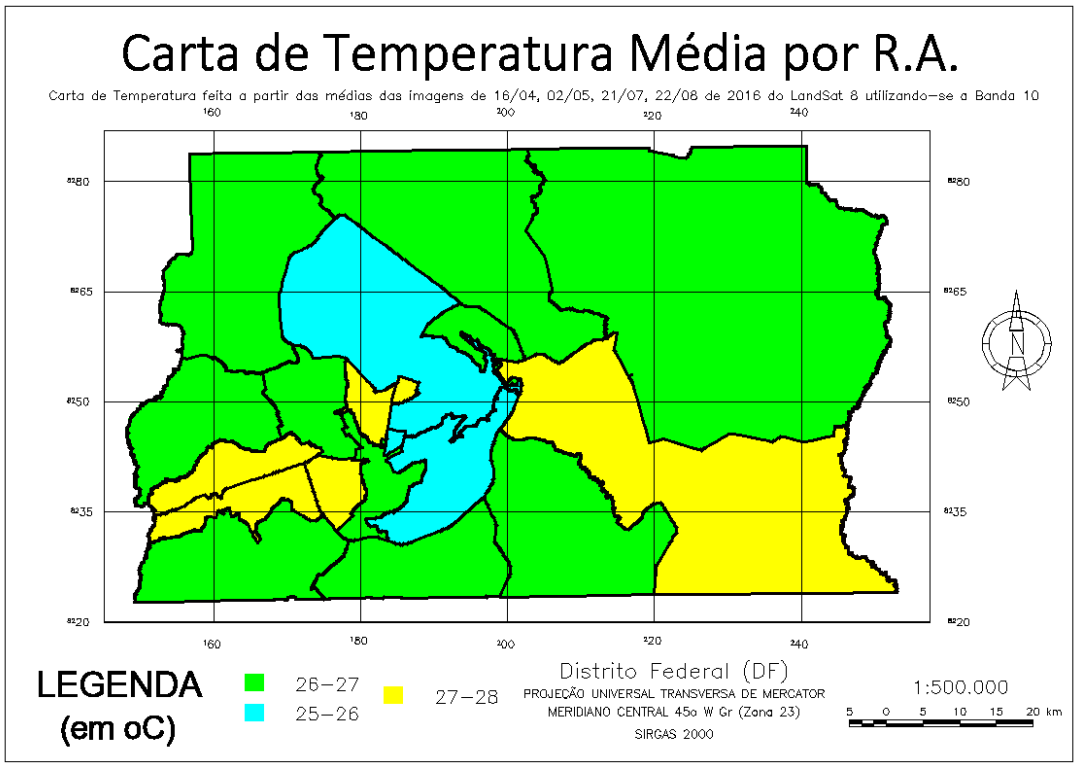


Figura 29: Carta de temperatura média por RA do DF das médias das imagens de 16/04, 02/05, 21/07, 22/08.

Observando-se as imagens de datas específicas e a imagem anterior (que sintetiza a média de temperatura de cada região), é possível constatar que o comportamento das regiões do Distrito Federal segue um padrão, em termos gerais, não muito difícil de se estabelecer. Primeiro, as regiões a leste do mapa (incluindo principalmente Planaltina e Paranoá) são regiões predominantemente agrícolas/rurais cuja temperatura média tenda a não ser muito alta, em média, mas que apresenta várias alterações sazonais (como após a colheita, quando o solo é exposto e as temperaturas médias aumentam).

Há ainda uma região propriamente urbana, ao centro do mapa, que é caracterizada por temperaturas mais amenas (embora possam ser maiores que as da região agrícola), compostas por regiões como Plano Piloto, Lago Norte e Lago Sul. Nessas regiões, sabe-se haver uma urbanização mais consolidada, com melhores equipamentos urbanos, menor densidade demográfica e maior arborização.

Por fim, há as regiões urbanas ao sudoeste do mapa. Essas regiões são as que estão, em média, com as temperaturas mais elevadas em relação aos outros locais. Essas regiões incluem principalmente Guará, Taguatinga, Ceilândia, Cruzeiro, Samambaia e Recanto das Emas. Em geral, essas regiões caracterizam-se de modo oposto às regiões anteriores, *i.e.* menor arborização de vias de acesso, urbanização mais precária e elevada taxa de ocupação.

As imagens analisadas até agora, porém, são de datas recentes e com amplitude temporal limitada, fornecendo informações somente sobre o estado atual do DF. Para compreender a evolução histórica das temperaturas no DF, faz-se necessário observar imagens mais antigas e mais distanciadas entre si no tempo.

6.4 HISTÓRICO DAS TEMPERATURAS NO DF

Para se avaliar a variação da temperatura de brilho de superfície com o tempo no território do DF foram obtidas imagens dos satélites LandSat. Inicialmente, já se tinham imagens do DF com o uso e a temperatura calculados, obtidos no projeto de iniciação científica "Processamento de imagens de satélite do Distrito Federal para cálculo de temperatura de brilho de superfície e avaliação sazonal da cobertura do solo"(BORGES, 2017).

Desse projeto, aproveitou-se a imagem do LandSat 8 da data de 16/04/2016, que não tinha cobertura de nuvens e tinha obtido uma boa classificação do uso do solo. Para ter-se uma noção da variação na temperatura provocada pela urbanização de certas áreas do DF, obtiveram-se imagens mais antigas do LandSat 5, sem qualquer presença de nuvens e com um espaçamento de cerca de 10 anos, em relação à imagem de 2016; assim, obtiveram-se as imagens de 24/06/2006, 30/05/1997 e 26/05/1984 (que foi a imagem com boa qualidade mais antiga encontrada no portal do *USGS*).

Uma vez analisadas e processadas as quatro imagens de todo o Distrito Federal para se obter

a sua temperatura de brilho de superfície, foi possível obterem-se os valores médios, máximos e mínimos de temperatura de cada uma das imagens. Os valores máximos e mínimos são obtidos diretamente no SPRING®, assim que se tem os planos de informação (modelos numéricos de terreno ou MNT's) de temperatura de cada uma das imagens. Os valores médios vem das medidas de classes dos planos de temperatura já fatiados, fazendo-se uma média da temperatura (considerando-se o valor central ou médio de cada classe de temperatura) ponderada pela área de cada classe. Os resultados obtidos estão presentes na Tabela 8. Vale lembrar que o sensor TM (*Thematic Mapper*) compreende as bandas 1 a 7 do LandSat 5, captando ondas de 0,45 a 2,35 μm, com *pixel* de 30 metros para as bandas comuns e de 120 metros para a banda térmica.[80]

Tabela 8: Dados das imagens de todo o DF.

Data	Satélite/Sensor	Mínimo (^oC)	Máximo (^oC)	Médio (^oC)
26/05/1984	LandSat 5/TM	12,03	33,41	23,93
30/05/1997	LandSat 5/TM	7,15	28,08	20,83
24/06/2006	LandSat 5/TM	4,12	30,16	20,89
16/04/2016	LandSat 8/TIRS	21,17	40,70	28,13

Os planos temáticos de temperatura de brilho de superfície estão representados nos mapas das Figuras 30 a 33.

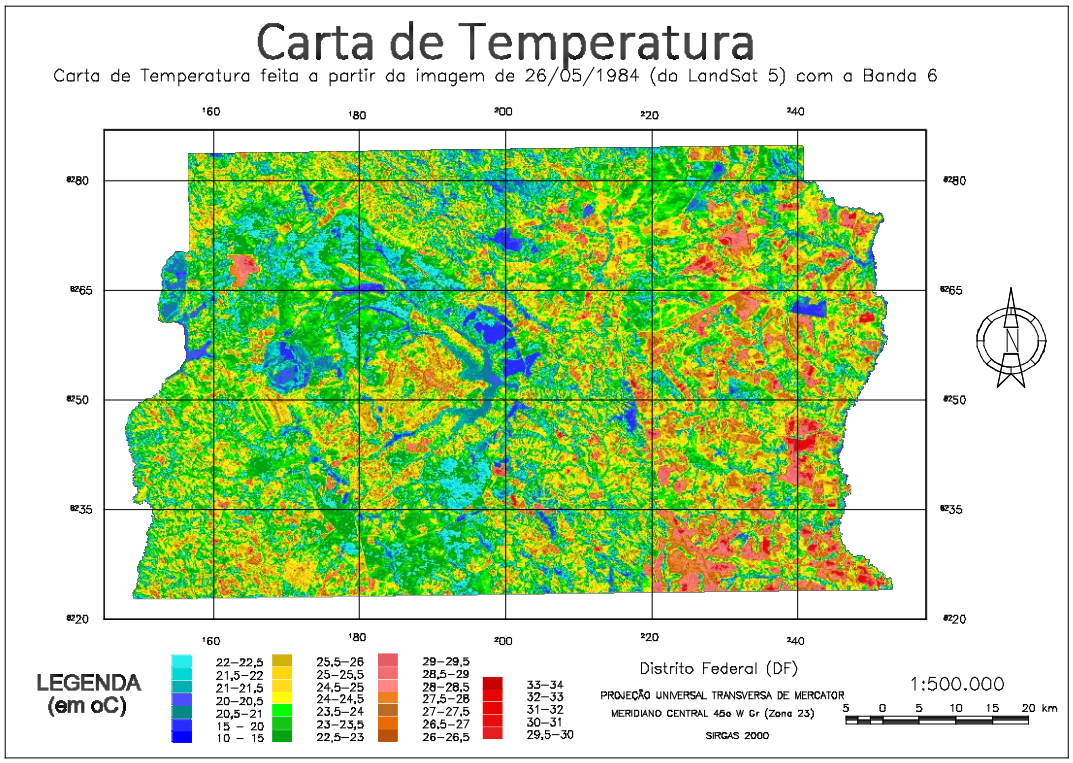


Figura 30: Carta de temperatura do DF de 26/05/1984.

[80]Fonte: https://landsat.usgs.gov/landsat-5-history; acesso em 29/11/2017.

Na data de 26/05/1984, em que se tem a segunda maior média de temperatura (essa posição se repete para os valores máximos e mínimos também), observa-se que a temperatura está distribuída de maneira mais homogênea no território, a maior parte ficando entre 22,5^oC e 25^oC. Contudo, observa-se ainda regiões mais frias perto, sobretudo dos corpos hídricos, bem como lugares bem quentes como os que derivam de zonas de ocupação urbana mais adensadas (a oeste) e regiões agrícolas, e que contém solo exposto, a leste.

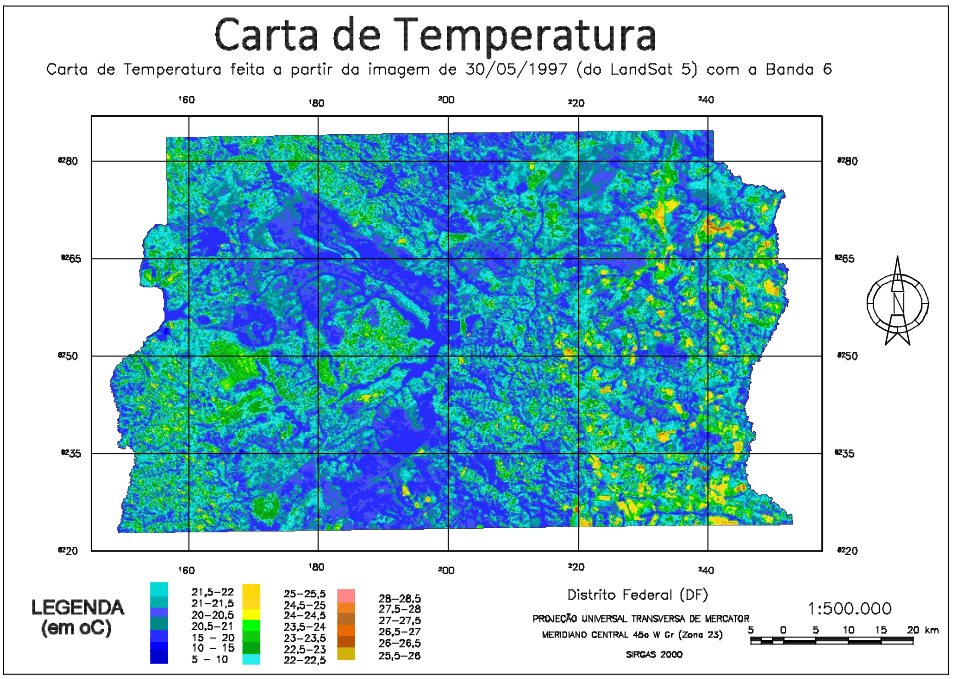


Figura 31: Carta de temperatura do DF de 30/05/1997.

A imagem de 30/05/1997, por sua vez, é a que possui os menores valores de temperatura média e máxima, estando a maior parte da imagem entre valores de 10^oC e 22,5^oC, uma vez que ainda se está no período chuvoso e a maior umidade é responsável por amenizar e estabilizar as temperaturas. Novamente, apesar da uniformidade de temperaturas, destacam-se ainda as ocupações urbanas próximas do lago Paranoá e a leste do mesmo e as regiões, supostamente agrícolas a leste do mapa, ambas por terem temperaturas levemente superiores ao mapa em geral.

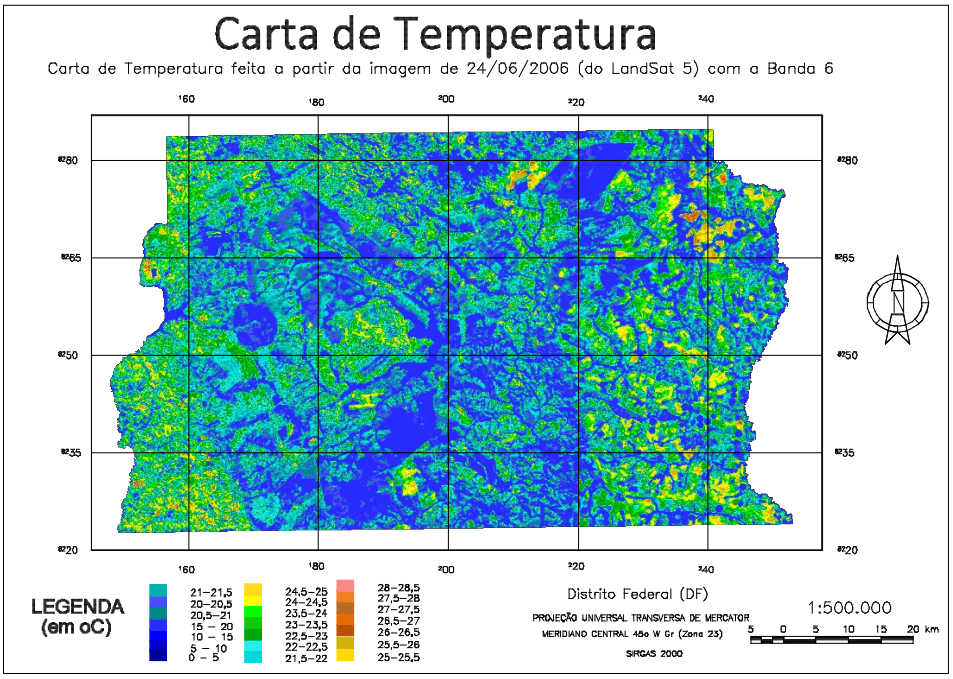


Figura 32: Carta de temperatura do DF de 24/06/2006.

A carta de 24/06/2006 tem valores de temperatura média e máxima levemente superiores aos valores encontrados para a imagem anterior de 30/05/1997; desse modo, boa parte das regiões do mapa ainda se encontram em temperaturas na faixa de 5^oC a $22{,}5^oC$. Contudo, as regiões mais quentes do que o seu entorno são mais destacadas devido ao seu maior valor de temperatura média, que, em alguns casos, atingem números superiores a 25^oC. Igualmente, essas regiões que se destacam por maiores temperaturas são as regiões urbanas centrais, áreas agrícolas a leste e a faixa a extremo oeste do mapa (regiões parcialmente rurais e parcialmente urbanas). A aproximação do período seco na data da imagem é responsável em boa medida por se ter uma maior heterogeneidade das temperaturas.

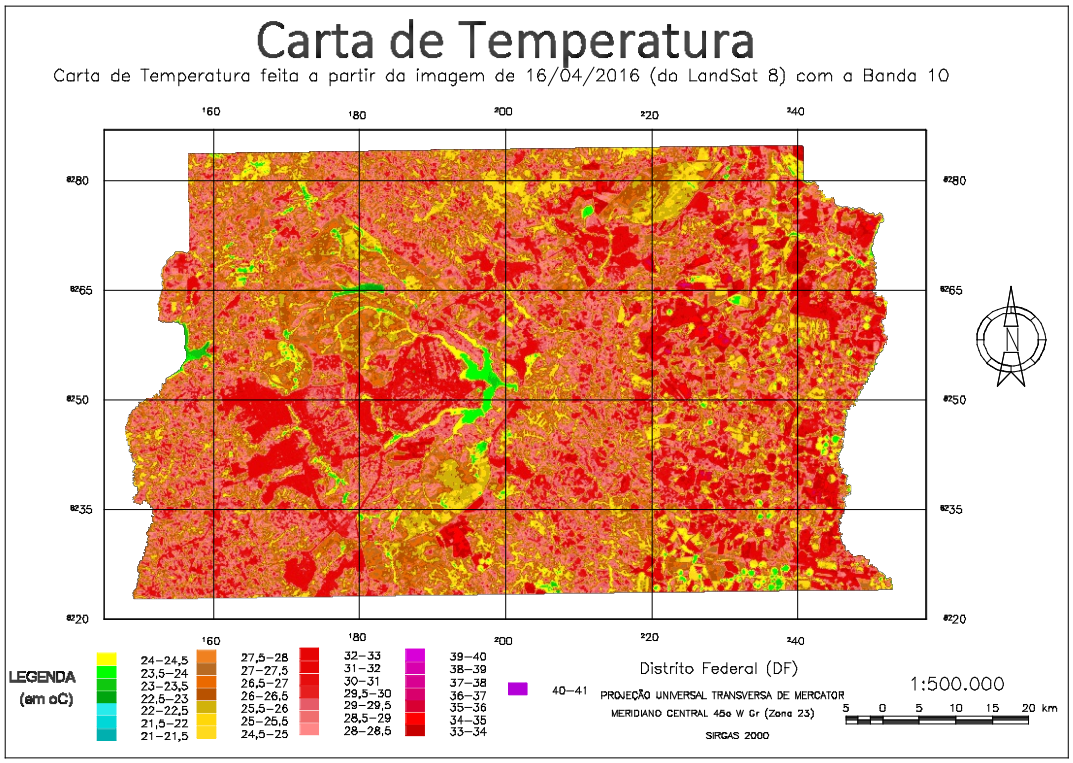
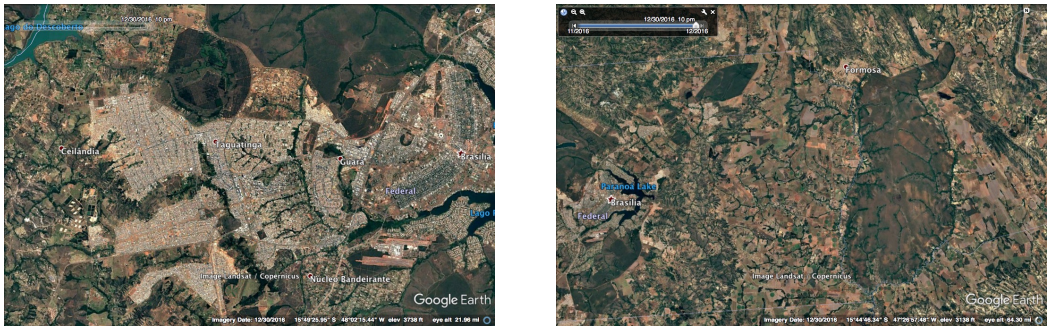


Figura 33: Carta de temperatura do DF de 16/04/2016.

A imagem de 16/04/2016 apresenta os maiores valores médio e máximo de temperatura de todas as imagens. De um modo geral, as temperaturas estão mais ou menos homogeneamente acima de 28^oC. Contudo, as mesmas áreas urbanas e agrícolas são observadas por possuírem uma maior temperatura média do que as áreas ao seu redor, como se espera conforme o modelo clássico das ilhas de calor.

Uma pesquisa por imagens recentes (de 2016) do *Google Earth* é capaz de mostrar facilmente que essas áreas ao centro e oeste do mapa, bem como ao leste do mapa, são áreas tipicamente urbanas e agrícolas, respectivamente, como será confirmado posteriormente na classificação do uso do solo. A Figura 34 registra esse fato.



(a) Região Urbana. **(b)** Região Agrícola.

Figura 34: Imagens do *Google Earth* de 30/12/2016.

Como o presente estudo versa sobre ilhas de calor urbanas, interessa apenas a região urbana

mostrada anteriormente para estudo. Contudo, mesmo nas regiões urbanas é possível distinguir entre as características distintas de cada grupo de aglomerações urbanas. Em todos os mapas, por exemplo, é possível observar, por exemplo, que a região correspondente à Asa Sul está, em geral, com temperatura inferiores (mais amenas) em relação às apresentadas em outras regiões à sua volta, especialmente em relação à região da Asa Norte.

Ainda, é possível ver a presença marcante de altas temperaturas nas regiões do centro e arredores de Taguatinga e de Ceilândia. Por esses motivos, escolheram-se essas duas regiões como representantes históricas de lugares com comportamentos bastante distintos em relação ao fenômeno estudado: a primeira com equilíbrio em sua composição urbana e ambiental de modo a atenuar a concentração de calor, e a segunda com alta taxa de ocupação urbana, intensificando o fenômeno.

As cartas de uso do solo para as imagens cuja temperatura foi calculada pode ser vista nas Figuras 35 a 38, seguidas das relações de uso do solo com a área total e a fração em relação à área total do DF , nas Tabelas 9 a 12.

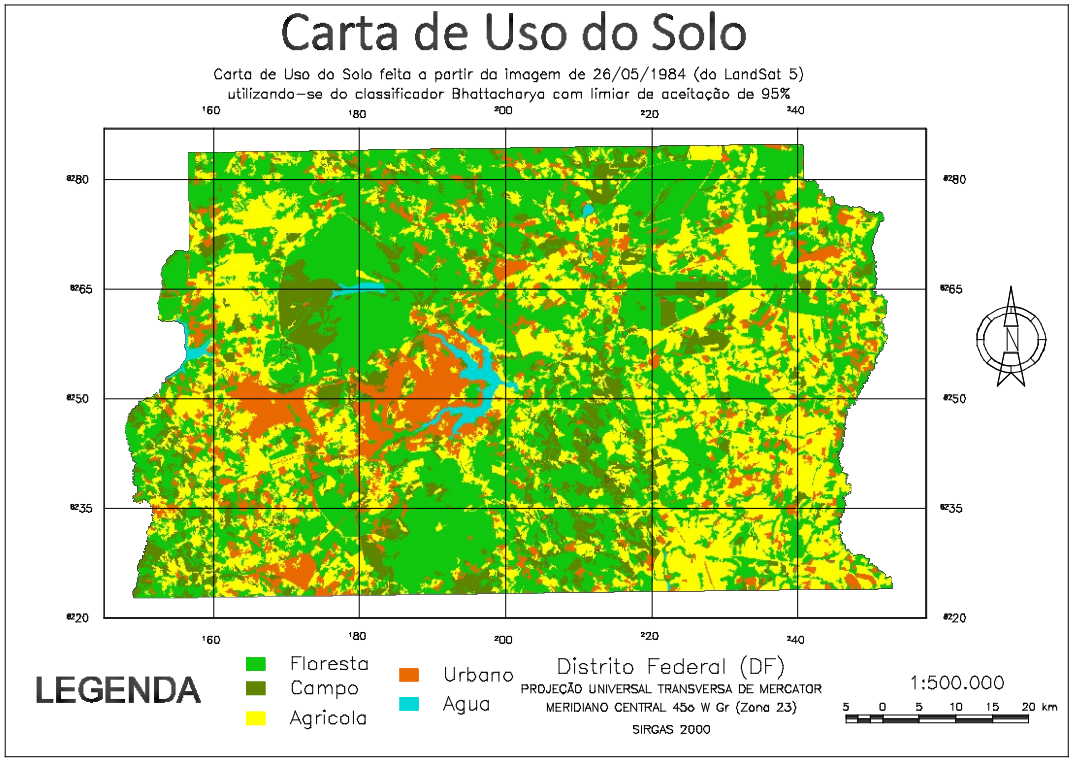


Figura 35: Carta de uso do solo do DF de 26/05/1984.

Tabela 9: Medida de classes do uso do solo para a imagem de 26/05/1984

Uso	Área (km^2)	Fração (%)
Urbano	669,55	11,64
Água	58,41	1,02
Agrícola	1733,18	30,12
Campo	666,07	11,58
Floresta	2626,11	45,65

Na imagem de 1984, observa-se que a fração de área do solo utilizada para fins agrícolas é considerável e que o desenvolvimento urbano ainda está em seus primórdios.

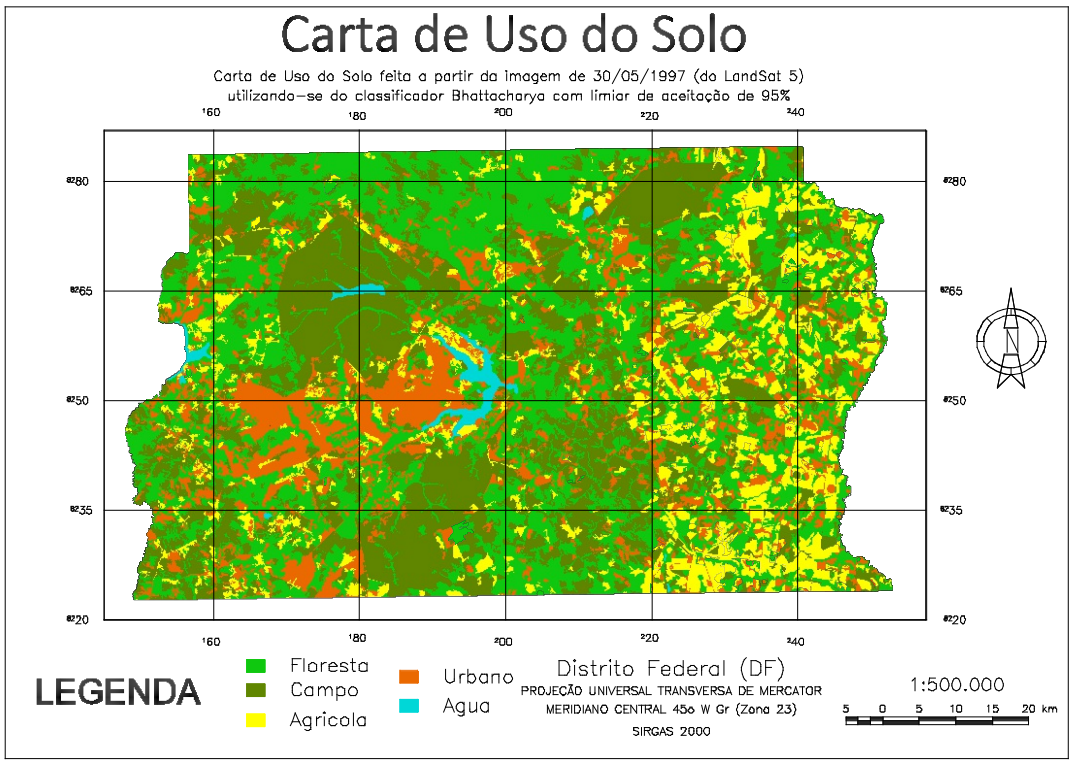


Figura 36: Carta de uso do solo do DF de 30/05/1997.

Tabela 10: Medida de classes do uso do solo para a imagem de 30/05/1997.

Uso	Área (km^2)	Fração (%)
Urbano	866,21	15,22
Água	58,16	1,02
Agrícola	730,02	12,83
Campo	1812,93	31,86
Floresta	2223,86	39,08

Mais de 10 anos após a imagem de 1984, o uso do solo do DF em 1997 torna-se mais urbano com uma redução da área destinada ao uso florestal e agrícola.

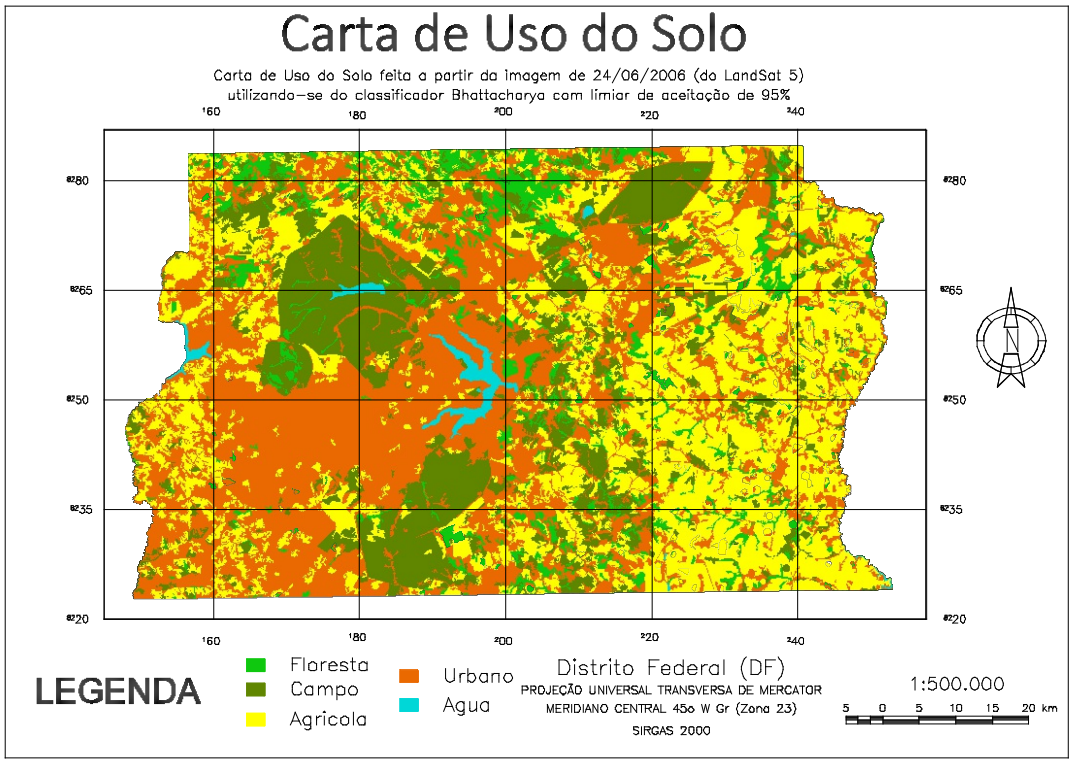


Figura 37: Carta de uso do solo do DF de 24/06/2006.

Tabela 11: Medida de classes do uso do solo para a imagem de 24/06/2006.

Uso	Área (km^2)	Fração (%)
Urbano	2152,69	37,93
Água	58,60	1,03
Agrícola	1938,27	34,15
Campo	1121,44	19,76
Floresta	404,75	7,13

Já em 2006 a área agrícola e urbana aumentam, enquanto que as áreas de campo e floresta se reduzem.

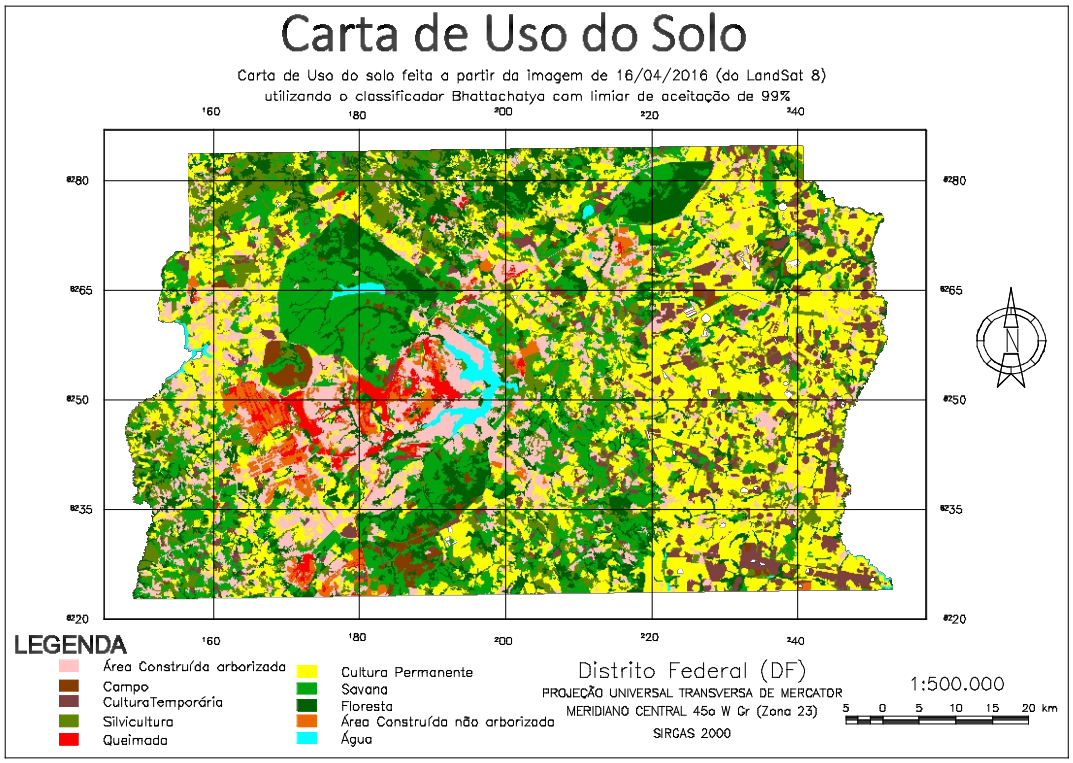


Figura 38: Carta de uso do solo do DF de 16/04/2016.

Tabela 12: Medida de classes do uso do solo para a imagem de 16/04/2016.

Uso	Área Total (km^2)	Fração (%)
Água	57,14	0,99
Área Construída não arborizada	145,21	2,53
Área Construída arborizada	775,32	13,49
Floresta	755,87	13,15
Savana	1062,40	18,48
Cultura Permanente	1682,11	29,26
Queimada	106,38	1,85
Silvicultura	677,16	11,78
Cultura Temporária	402,66	7,00
Campo	84,31	1,47

Fazendo-se uma tabulação cruzada da temperatura com o uso do solo, obtém-se dados que, conforme já se esperava, apresentam a relação característica entre ocupação urbana e aumento da temperatura média. Os dados da tabulação cruzada do uso do solo com a temperatura média são observados no gráfico da Figura 39. Na classificação da imagem de 2016 (proveniente do projeto de pesquisa supracitado), juntaram-se as classes de silvicultura e floresta na nova classe de floresta, as áreas agrícolas permanente e temporária foram unidas à nova classe de área agrícola, a classe de campo englobou as antigas classes de savana, campo e queimada, e as classes de área urbana arborizada e não arborizada, foram unidas à classe de área urbana.

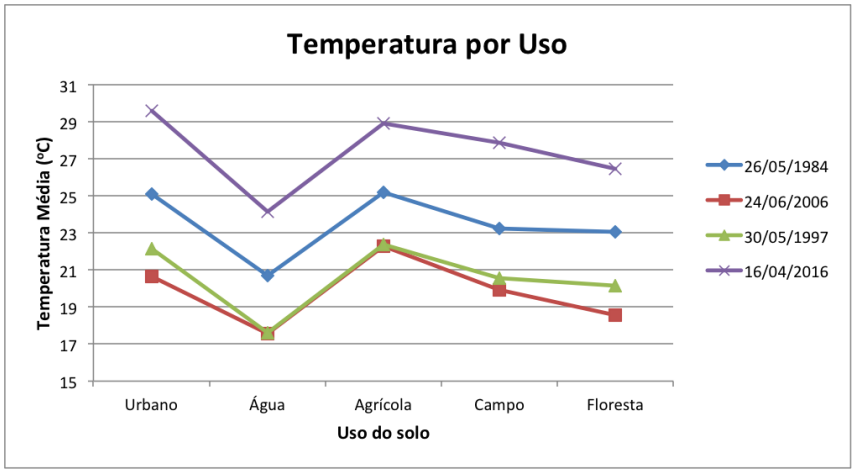


Figura 39: Temperatura média por uso do solo.

Os dados obtidos da tabulação cruzada confirmam os próprios resultados do outro trabalho (BORGES,2017), em que se analisaram imagens dos anos de 2013 a 2016 do DF, com cerca de quatro imagens por ano. Neste trabalho, constatou-se uma relação direta do uso do solo com a temperatura média do mesmo: quanto maior é a quantidade e densidade de vegetação (seja ela natural ou artificial) sobre o solo, menor é a temperatura de brilho de superfície, ao passo que regiões urbanizadas (principalmente as regiões urbanas com pouca ou nenhuma arborização) tendem a ser mais quentes. A água, devido ao seu alto calor específico, apresenta baixas temperaturas nas imagens, que são obtidas por volta das 10h00 a 10h30 da manhã. As regiões de solo exposto e as queimadas apresentam as maiores temperaturas, e as áreas agrícolas tem temperatura que varia sazonalmente com os ciclos agrícolas (mais quentes após a colheita, mais amenas nas outras épocas do ano).

Pode-se observar ainda, nas cartas de uso, que houve uma expansão da mancha de ocupação urbana no DF ao longo dos anos. Essa ocupação abrange especialmente a região do bairro Noroeste, que até os anos 2000 era predominantemente uma reserva ambiental e uma área de ocupação indígena (apesar de já haver previsão de sua construção nos anos 1980 [81]), mas que foi lançada definitivamente como bairro residencial no ano de 2009, atraindo várias construtoras interessadas em empreendimentos no novo setor habitacional. O bairro havia sido previsto como o primeiro do Brasil a ser construído inteiramente de maneira ecologicamente sustentável, o que não é absolutamente verificável de acordo com a estruturação urbanística da região. Espera-se que a população atinja a marca de 40.000 moradores, habitando 15.000 apartamentos (além dos trabalhadores domésticos, prediais e empregados dos comércios locais).[82]

Desse modo, torna-se em especial interessante analisar o fenômeno das ilhas de calor ao longo da evolução da ocupação do setor Noroeste, antes, durante e após o estabelecimento do mesmo.

[81] Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Setor_Noroeste_(Bras%C3%ADlia); acesso em: 04/10/2017.

[82] Fonte: http://sites.correioweb.com.br/app/noticia/encontro/revista/2012/10/30/interna_revista,45/nasce-o-noroeste.shtml; acesso: 04/10/2017.

6.5 O SETOR NOROESTE

Inicialmente, fez-se um polígono envolvendo o Noroeste no *Google Earth*®, o qual pode ser visto na Figura 40. Esse polígono foi exportado do *Google Earth*® e importado para o SPRING®, no formato *kml*. Tendo sido utilizado para se recortar os planos de informação de temperatura do DF das datas utilizadas na subseção anterior, tanto os temáticos como os modelos numéricos de terreno, de modo que foi possível obter as temperaturas mínimas, médias e máximas da região para cada uma das datas analisadas na seção anterior. Compilando-se os dados obteve-se o gráfico da Figura 41. Vale notar que o parque ecológico Burle Marx (em verde) não foi considerado como integrante do setor Noroeste (em vermelho) para os fins dessa pesquisa uma vez que ele não configura propriamente uma área típica de ocupação urbana.

Figura 40: Polígono do setor Noroeste.

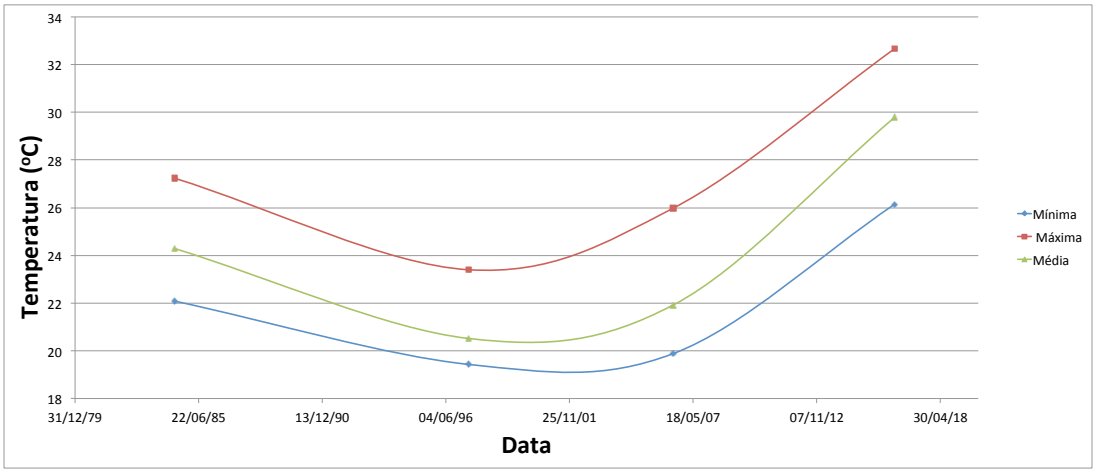


Figura 41: Temperaturas média, mínima e máxima do setor Noroeste.

Pode-se observar que as temperaturas no Noroeste tendem a crescer a partir de 1997, após a qual se intensificaram as construções iniciais na região atingindo uma média de quase 30^oC, o que era de se esperar de uma aglomeração urbana densa.

Juntamente com a análise da temperatura, pode-se obter o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

O NDVI fornece resultados que variam de -1 a 1, indicando a presença de vegetação e tendo uma forte correlação com a cobertura do solo (BORGES, 2017). Em geral, quanto mais baixo o valor de NDVI (para valores ainda positivos), tem-se uma forte indicação da ausência de vegetação natural e/ou artificial e uma maior presença de solo exposto ou áreas urbanas, permitindo-se assim identificar o processo de urbanização.

Por meio de operações aritméticas entre as bandas, é então possível calcular uma imagem de NDVI, que é posteriormente fatiada (em classes de -1 a 1, variando de 0,1 em 0,1). O resultado, que é um plano temático, permite que se faça uma medida de classes para o plano de NDVI de cada data (já recortado pelo polígono do Noroeste). Assim, pode-se calcular o valor de NDVI médio de cada data, obtendo-se o gráfico da Figura 42.

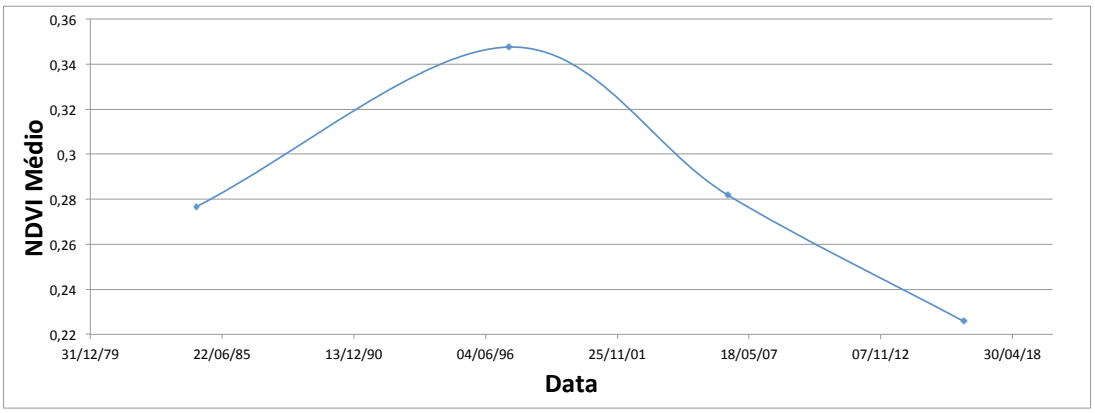


Figura 42: NDVI médio do setor Noroeste.

Pode-se observar que o NDVI segue um comportamento análogo ao da temperatura embora ao inverso: a partir de 1997, o NDVI tende a decrescer, mesmo que ainda de maneira sutil, devido há grande área ainda não construída dentro do próprio Noroeste. Assim, relacionando o NDVI com temperatura, e conhecendo-se o histórico de urbanização da região é possível entender que a maior urbanização promoveu uma perda da área naturalmente vegetada, acarretando em um aumento médio da temperatura, de acordo com o modelo clássico das ilhas de calor.

6.6 RELATÓRIO DE VISITA TÉCNICA OU DE CAMPO

Uma vez selecionadas as regiões que seriam objeto de investigação do presente estudo, foram feitas visitas de campo a cada uma das localidades. Embora não fosse possível observar exaustivamente todas as nuanças de ocupação e uso do solo, escolheram-se algumas áreas representativas de cada região a fim de se buscar uma classificação da tipologia urbana e identificar as possíveis causas do comportamento térmico de cada região. As figuras seguintes são acompanhadas da localização da rua/quadra onde foram tiradas ou de um ponto de referência próximo.

6.6.1 ASA SUL

A Asa Sul, que fica dentro da região administrativa do Plano Piloto, é uma região tombada pelo patrimônio histórico e, portanto, seu uso apresenta maiores restrições do que outras áreas consideradas, especialmente a limitação, nas quadras residenciais, de se construir edifícios de apartamentos com, no máximo, seis andares.

O limite de gabarito evita a verticalização excessiva da cidade (como ocorre em outras regiões como Águas Claras) e torna a densidade demográfica menor. Prédios mais baixos também favorecem uma melhor circulação do ar, evitando o acúmulo de poluentes e a concentração de ar quente.

Como pode ser visto nas Figuras 43 e 44 retiradas das quadras 303 e 103 da Asa Sul, as ruas comerciais apresentam também prédios não muito altos (em geral, no máximo dois pavimentos) o que amplia o efeito anteriormente mencionado. Tanto as quadras comerciais quanto as residenciais apresentam maior espaçamento entre edificações e mais espaço para circulação de pedestres, comparado com outros bairros do DF. Em todos os casos, observam-se nessas quadras (residenciais/comerciais) boa arborização e também, em alguns casos, presença de vegetação rasteira.

(a) Localização da área comercial da Quadra 303 Sul.

(b) Área comercial da Quadra 303 sul.

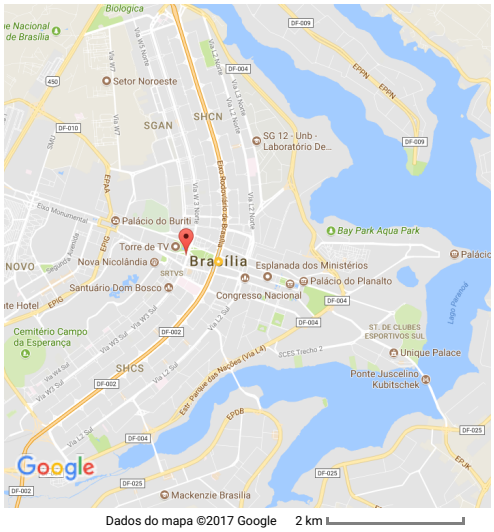
Figura 43: Superquadra 303 Sul.

(a) Localização da Quadra 103 Sul.

(b) Área residencial da Quadra 103 sul.

Figura 44: Superquadra 103 Sul.

Já nas regiões de grandes vias de circulação, como é o caso do eixo monumental e dos arredores do setor hoteleiro sul (Figura 45), há relevante presença de materiais tipicamente causadores de ilhas de calor (como o concreto asfáltico) e uma tipologia urbana com prédios altos, vegetação mais escassa e predominantemente rasteira, além de grandes espaços vazios com insolação direta no solo. Vale notar ainda, a presença do parque Sarah Kubitscheck, que ajuda a minimizar a concentração de calor nas áreas tipicamente urbanas, e a formar o assim chamado efeito oásis.



(a) Localização da via S1 sul.

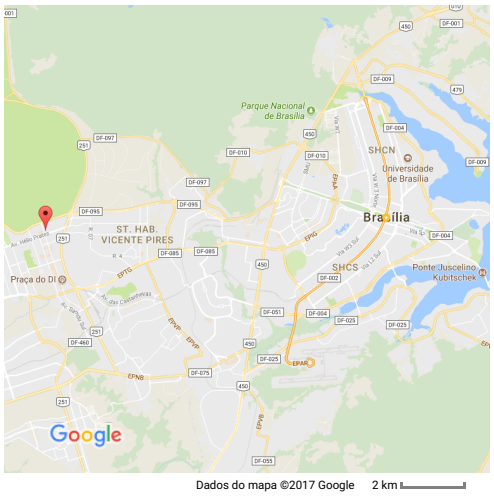
(b) Eixo Monumental próximo ao setor hoteleiro sul.

Figura 45: Setor Hoteleiro Sul.

A vegetação paisagística abundante nas quadras residenciais e comerciais da Asa Sul favorecem a criação de microclimas mais amenos, uma vez que ela é uma excelente refletora de radiação infravermelha. De fato, como foi visto na *Revisão Bibliográfica*, bons refletores são maus absorvedores e, portanto, maus emissores. Absorvendo e emitindo poucas ondas eletromagnéticas na faixa do infravermelho, que é o responsável principal por aquecer os objetos por radiação, a vegetação evita o aumento de temperatura no local.

6.6.2 TAGUATINGA

A região de Taguatinga é caracterizada por possuir uma arborização significativamente inferior ao que existe em regiões centrais do DF, principalmente em regiões em que há predomínio de casas e pequenos e médios estabelecimentos comerciais que aparentam maior concentração urbana que a Asa Sul, o que foi observado ao se visitar a região da quadra QNG 27 (Figura 46).



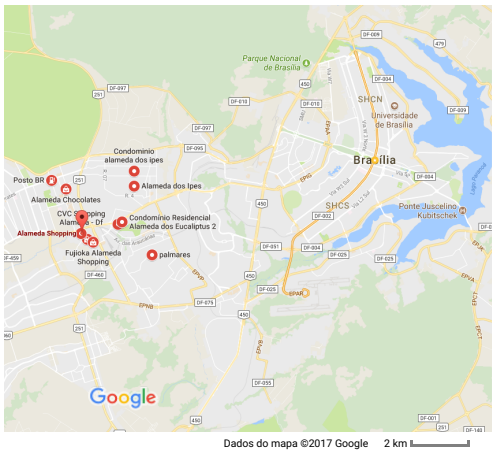
(a) Localização da Quadra QNG 27.

(b) Área residencial da Quadra QNG 27.

(c) Área comercial da Quadra QNG 27.

Figura 46: Quadra QNG 27 (Taguatinga Norte).

Sabe-se ainda que nas regiões mais centrais de Taguatinga (Figura 47), há uma grande quantidade de prédios altos, comércios mais locais e também amplas vias rodoviárias, mas ainda não se observa uma arborização significativa. O único local com maior presença de vegetação é o Taguaparque, mas o mesmo encontra-se fora do interior das grandes aglomerações urbanas em Taguatinga.



(a) Localização do Avenida Comercial.

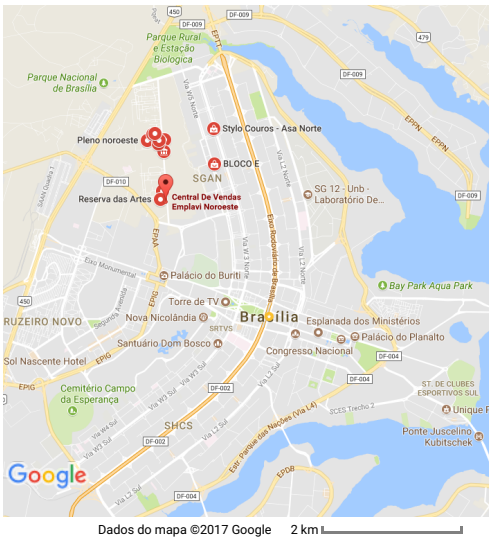
(b) Avenida Comercial.

Figura 47: Avenida Comercial (Taguatinga Sul).

A grande presença de materiais de cores escuras e formados por compostos bons absorvedores de energia eletromagnética, como o asfalto, o vidro e o concreto (de cimento *Portland*) nos aglomerados urbanos de Taguatinga, favorecem a absorção da energia, que é reemitida na forma de ondas curtas (na faixa do infravermelho), causando um aumento significativo na temperatura local, o que é agravado pelo ausência de uma arborização adequada.

6.6.3 SETOR NOROESTE

O setor Noroeste, por ser ainda muito recente, é praticamente um canteiro a céu aberto, contendo grande número de obras de edificações residenciais em andamento, como se observa na Figura 48, cujas fotos foram tiradas em locais próximos ao estande de vendas da Emplavi. É possível observar ainda, ao lado das obras, regiões ainda não ocupadas com presença de vegetação *in natura* não podada e, portanto, fora do padrão de paisagismo urbano, o que contribui para a manutenção do NDVI da região como um todo e impede que as temperaturas cresçam em demasia, apesar das construções.



(a) Localização da central de vendas de apartamentos.

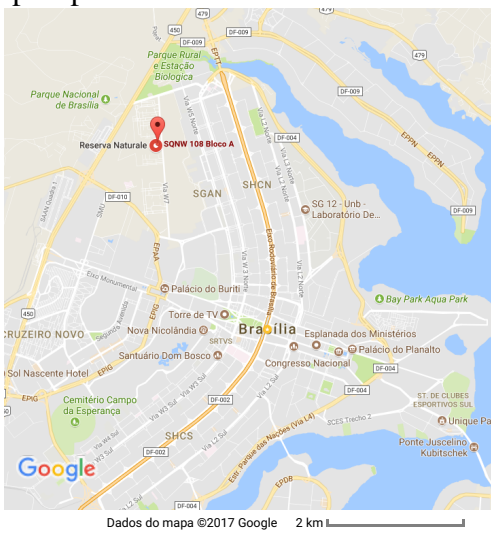
(b) Canteiro de edificações residencial no setor Noroeste.

(c) Vegetação não paisagística.

Figura 48: Canteiros de obra (Noroeste).

Em geral, os prédios residenciais e as quadras comerciais tentam seguir um padrão semelhante ao possuído pela Asa Sul (prédios residenciais de até 6 andares e comerciais de até 2 andares), havendo, entretanto, menor arborização que esta (as árvores presentes estão sobretudo em terrenos baldios e não nos arredores mais próximos das edificações), como se observa nas Figuras 49 e 50. Não se sabe ainda qual será o resultado urbanístico e paisagístico final, mas a indicação é de que tenha uma menor arborização e uma maior concentração urbana, devido ao valorizado preço dos imóveis na região. Por fim, a presença do parque Burle Marx ajuda ainda a manter uma umidade maior e uma temperatura mais amena, quando se considera toda a área do setor Noroeste.

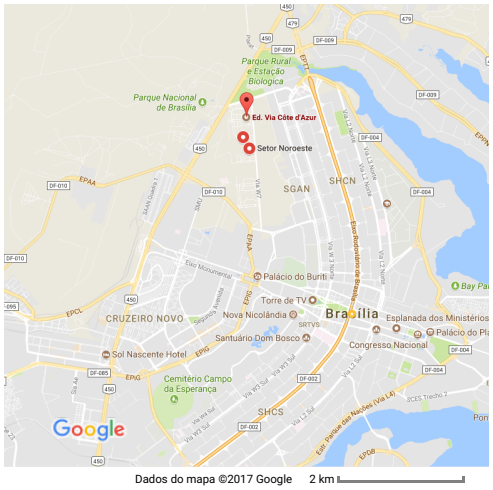
.pdf .pdf



(a) Localização da quadra SQNW 108.

(b) Área residencial da quadra SQNW 108.

Figura 49: Quadra 108 do Noroeste.



(a) Localização do edifício Via Côte D'Azur (quadra SQNW 111).

(b) Área comercial da quadra SQNW 111.

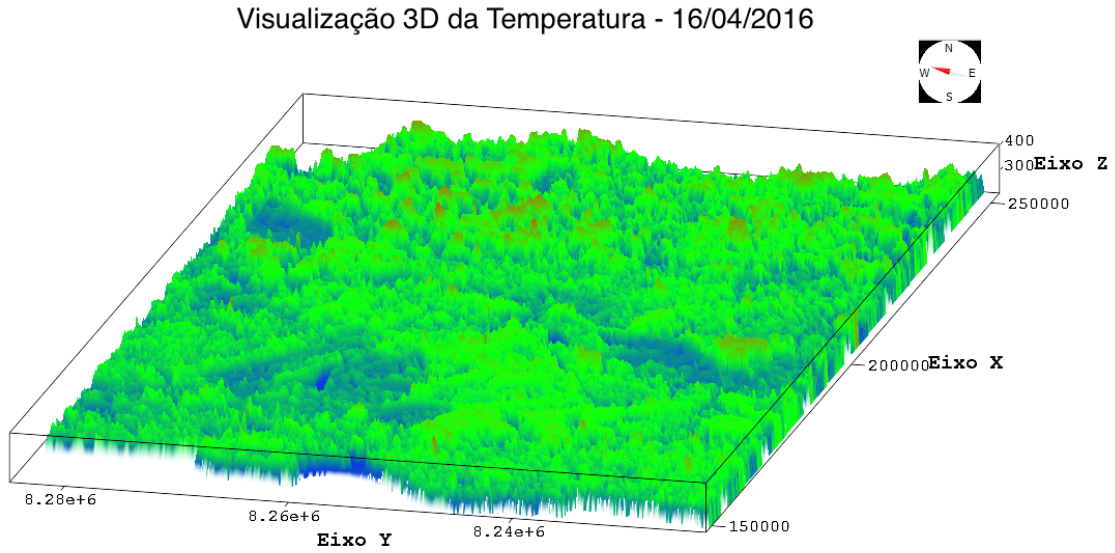
Figura 50: Quadra 111 do Noroeste.

6.7 RELEVO E PERFIL DE TEMPERATURA NO DF

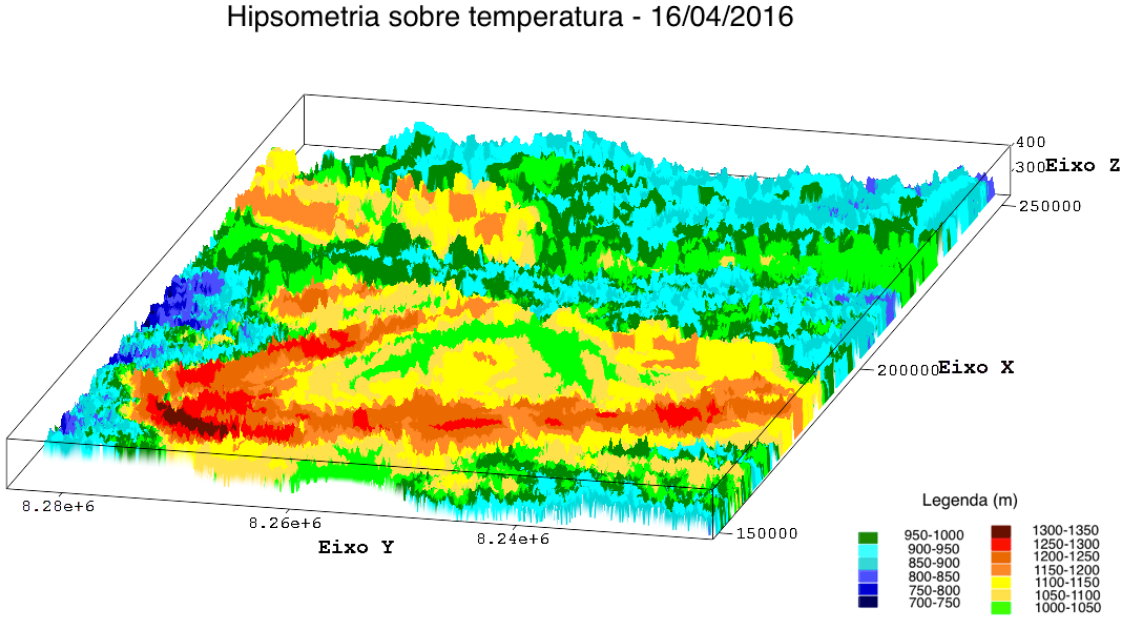
Inicialmente, com os modelos numéricos de terreno de temperatura das imagens de 16/04, 02/05, 21/07 e 22/08 do ano de 2016, obtiveram-se visualizações 3D de cada plano de informação. Como a temperatura tinha uma amplitude de valores baixos, multiplicou-se o seu valor por 10 e utilizou-se o exagero vertical máximo permitido no SPRING®. Posteriormente, sobrepôs-se o plano temático de hipsometria do DF ao modelo tridimensional da temperatura. As Figuras

51 a 54 retratam os modelos de temperatura com visualização tridimensional e os modelos tridimensionais de temperatura com sobreposição da hipsometria.

Nos eixos X e Y, estão representados as coordenadas geográficas do DF (como nas cartas mostradas anteriormente), e no Eixo Z, a temperatura em $10^{-1}\ ^{o}C$. Nos modelos tridimensionais de temperatura, o azul representa temperaturas baixas, o verde, intermediárias, e o vermelho, elevadas. A bússola na extremidade superior direita dos modelos de temperatura indica a orientação de inclinação do mapa do DF, com a ponta vermelho indicando a posição do norte original; a hipsometria foi sobreposta mantendo-se a orientação.



(a) Visualização 3D da Temperatura.

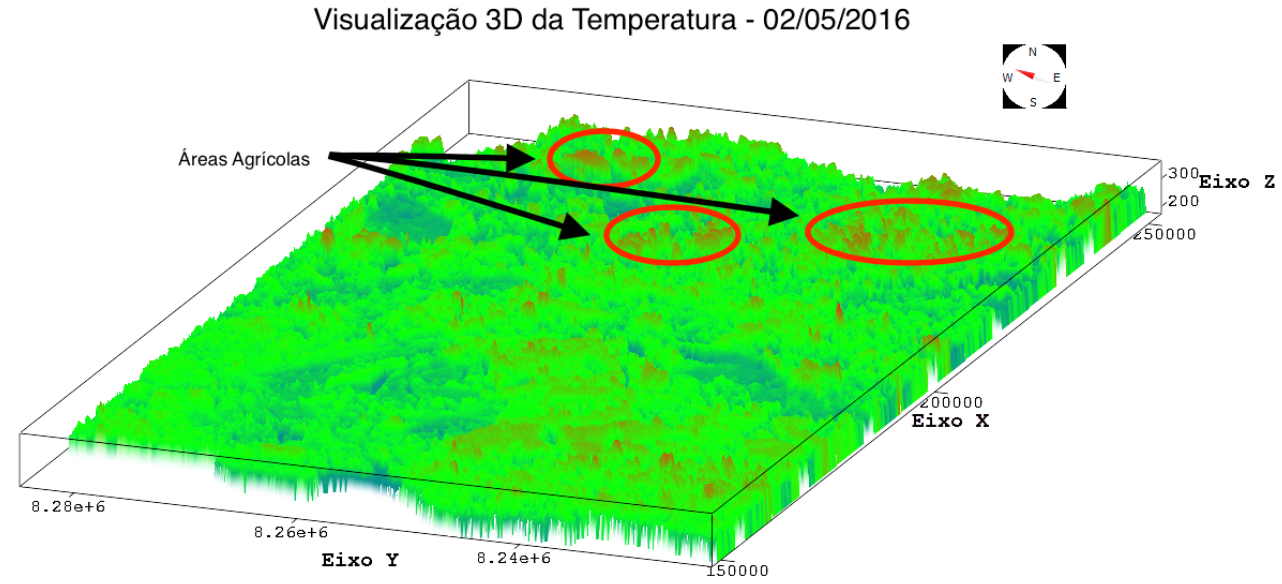


(b) Hipsometria sobre temperatura.

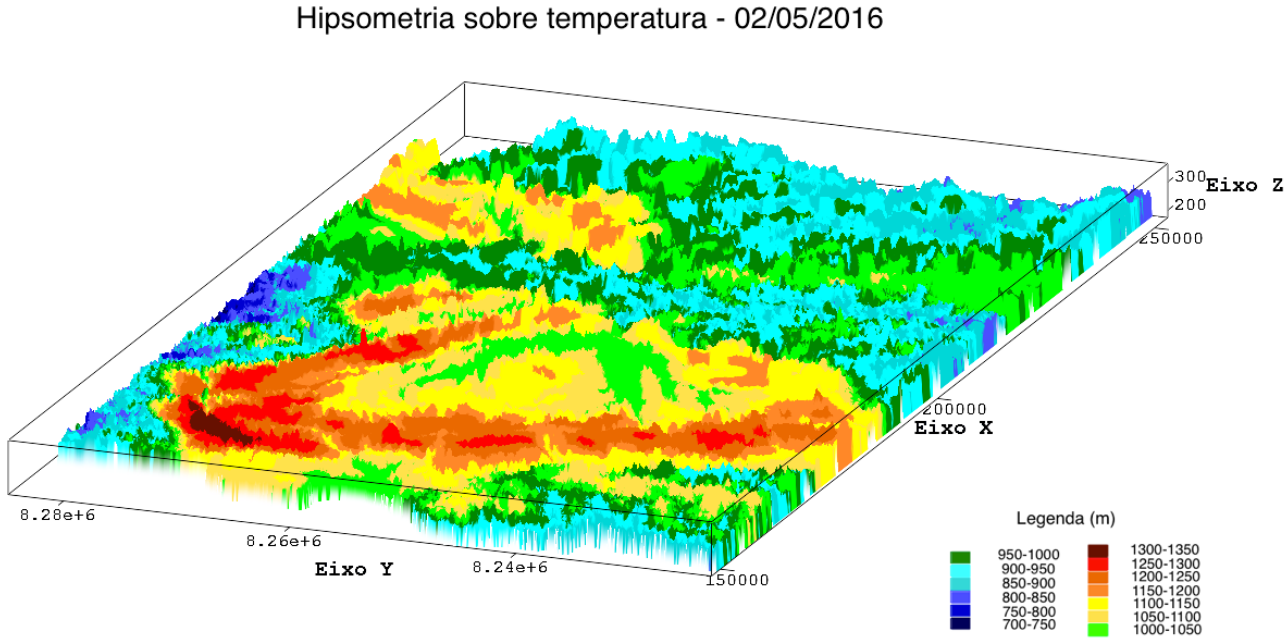
Figura 51: Modelo 3D de temperatura para a imagem de 16/04/2016.

A partir do modelo de 16/04, é possível observar a formação de áreas com picos de tempe-

ratura, assemelhando-se ao modelo mono-nucleado de ilha de calor. As maiores temperaturas, porém, estão localizadas principalmente ao leste do mapa, nas regiões tipicamente agrícolas, que tem picos, muito provavelmente, por estarem em épocas após a colheita com o solo exposto. A sobreposição da hipsometria não acrescenta mais informações relevantes, uma vez que ainda não é possível observar uma correlação de altitude de temperatura.



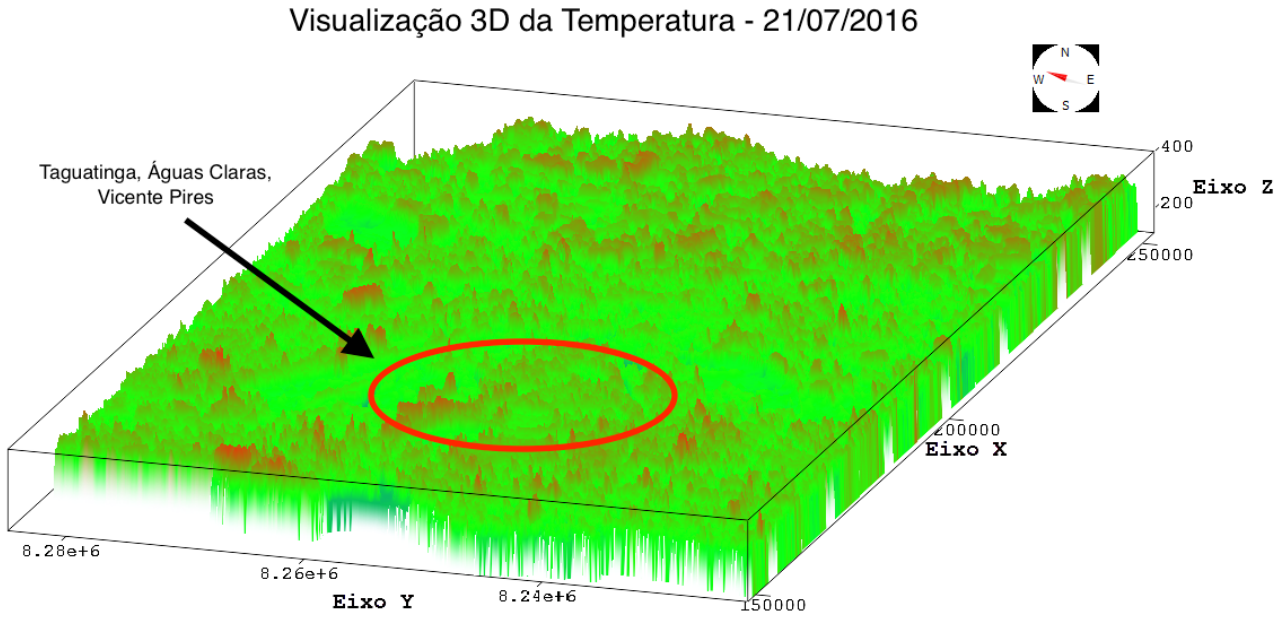
(a) Visualização 3D da Temperatura.



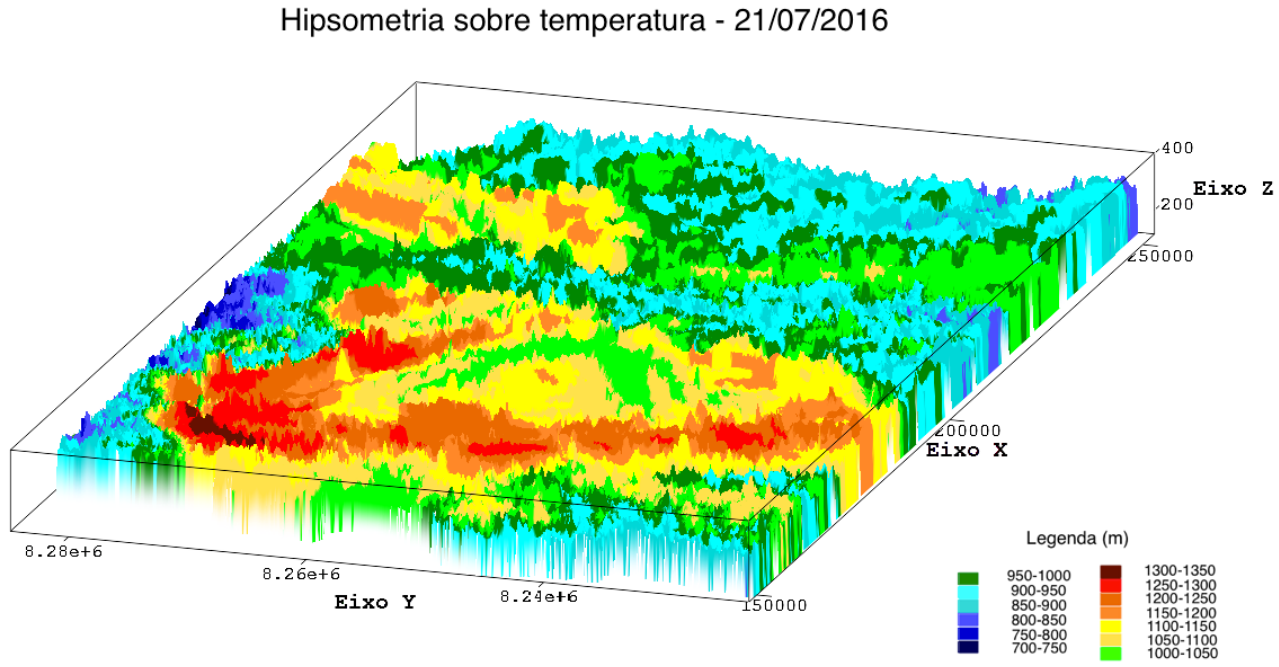
(b) Hipsometria sobre temperatura.

Figura 52: Modelo 3D de temperatura para a imagem de 02/05/2016.

No modelo de 02/05, é possível observar picos de temperatura com maior intensidade do que na imagem da data anterior (16/04), tanto nas regiões urbanas, quanto nas agrícolas, embora as áreas agrícolas apresentem uma aglomeração maior de pontos com grande temperatura.



(a) Visualização 3D da Temperatura.

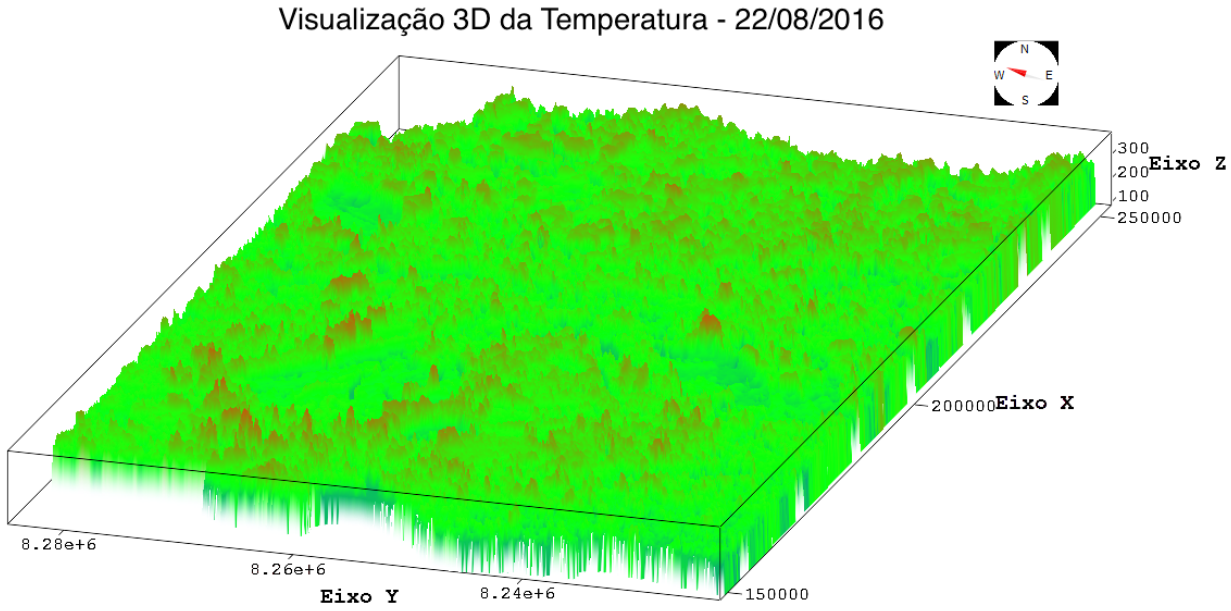


(b) Hipsometria sobre temperatura.

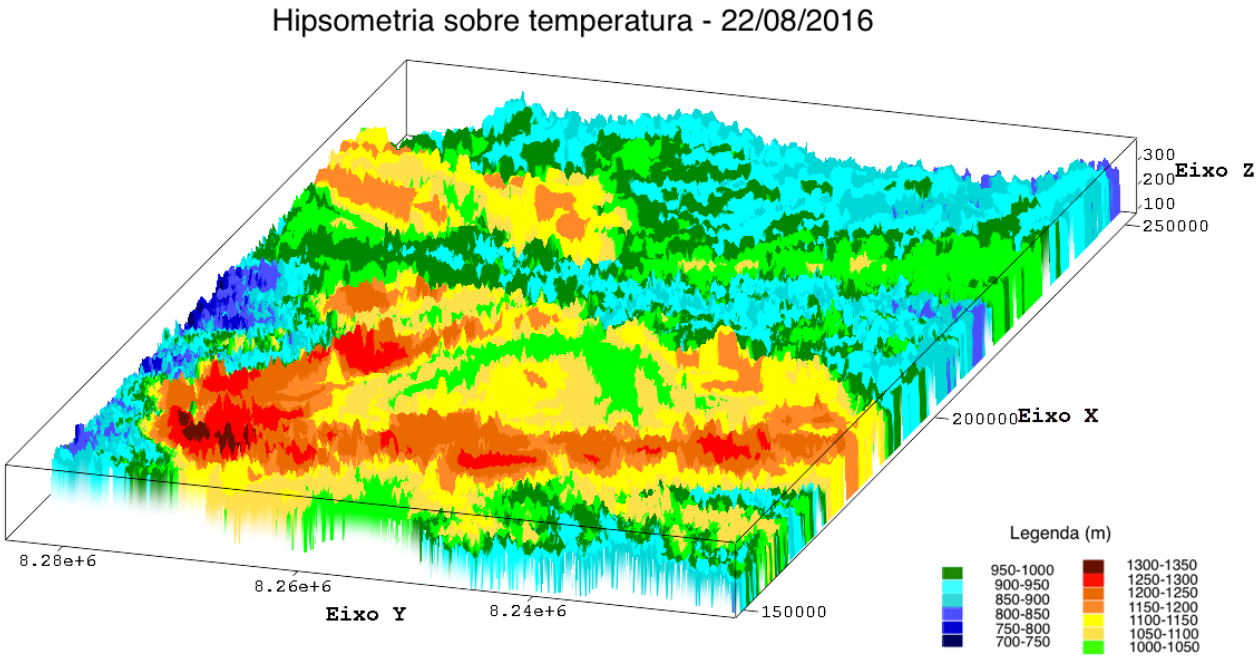
Figura 53: Modelo 3D de temperatura para a imagem de 21/07/2016.

Com o modelo numérico em visualização 3D da data de 21/07, pode-se observar claramente picos de temperatura mais elevados nas regiões urbanas, principalmente nas regiões equivalentes a Taguatinga, Águas Claras e Vicente Pires, os quais chegam a equivaler aos picos das regiões de cultura agrícola. Nota-se ainda que há "vales"de temperatura ao redor dos picos, o que indica uma menor concentração urbana, maior vegetação pela formação do efeito oásis. Igualmente observa-se que a região mais central do DF, apesar de ter picos de temperatura, apresenta picos bem menos acentuados que a região marcada com o círculo vermelho na imagem,

mas ainda maior que em regiões ao norte e sudeste dessa mancha urbana.



(a) Visualização 3D da Temperatura.



(b) Hipsometria sobre temperatura.

Figura 54: Modelo 3D de temperatura para a imagem de 22/08/2016.

O modelo da data de 22/08 apresenta maior uniformidade de temperatura entre as várias regiões urbanas (com picos próximos também das regiões agrícolas). Contudo, o centro da cidade ainda apresenta temperaturas menores que seus arredores.

Posteriormente, fez-se uma visualização 3D do modelo numérico de relevo do terreno, com o intuito de facilitar a visualização da relação da temperatura com a altitude. Nesse caso, não se multiplicou os valores do MNT. Assim, foi possível sobrepor os planos temáticos de tempe-

ratura de cada uma das datas de 2016. Os modelos tridimensionais estão retratados nas Figuras 55 a 59.

Os eixos X e Y mantém o mesmo sentido dos modelos anteriores, sendo o eixo Z indicador da altitude em metros (com as marcas de 800, 1.000 e 1.200 metros); novamente, as altitudes crescem nas cores do azul, passando pelo verde, até o vermelho. A orientação está representada na bússola da Figura 55, e manteve-se a mesma para os outros modelos. A legenda adicionada nas Figuras 56 a 59 segue o mesmo padrão da legenda das cartas de temperatura anteriores; contudo, foram mostrados apenas alguns valores para facilitar a leitura.

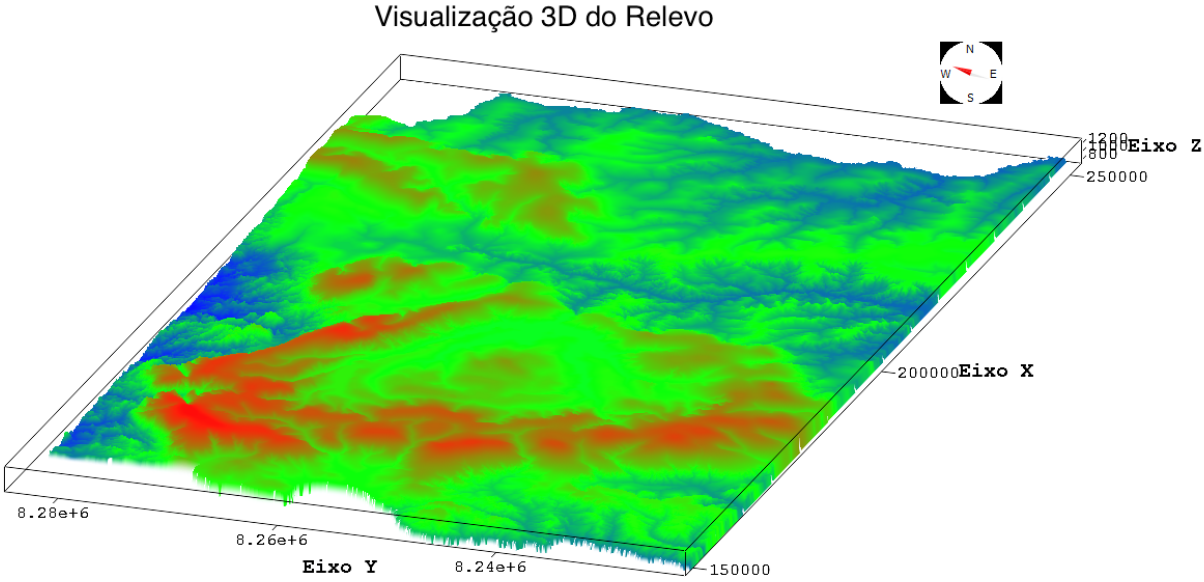


Figura 55: Visualização 3D do relevo do DF.

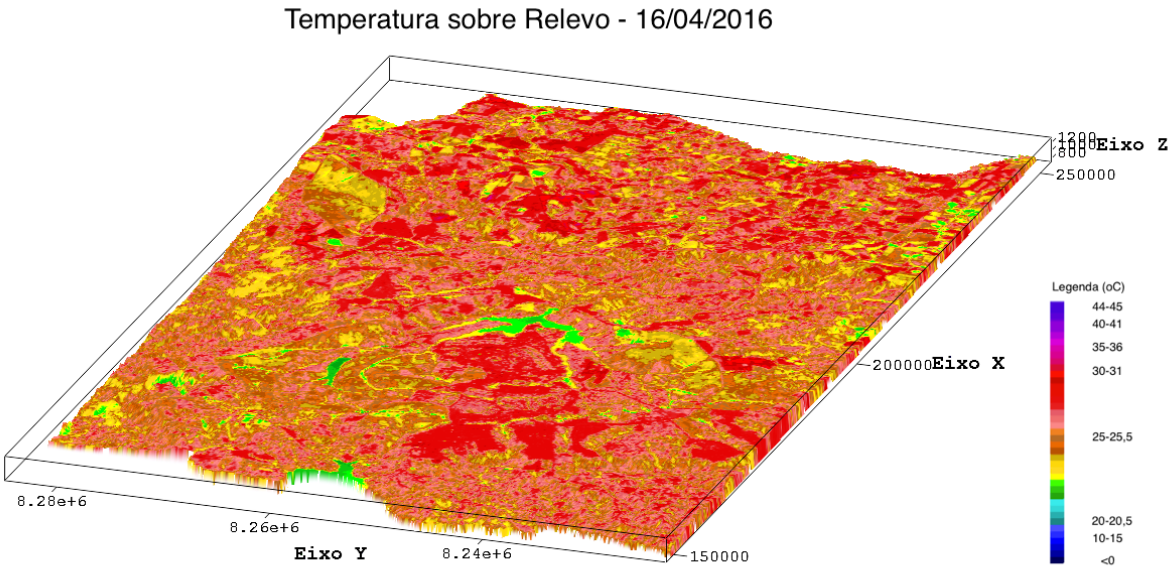


Figura 56: Temperatura sobre relevo para a imagem de 16/04/2016.

Na imagem de 16/04, é possível perceber uma alta concentração de temperaturas nas regiões

urbanas centrais do DF, assim como altos valores de temperatura nas regiões agrícolas a leste. Embora todo o DF esteja a grandes temperaturas, é notória a formação de regiões claramente mais quentes em nítido contraste com o seu entorno.

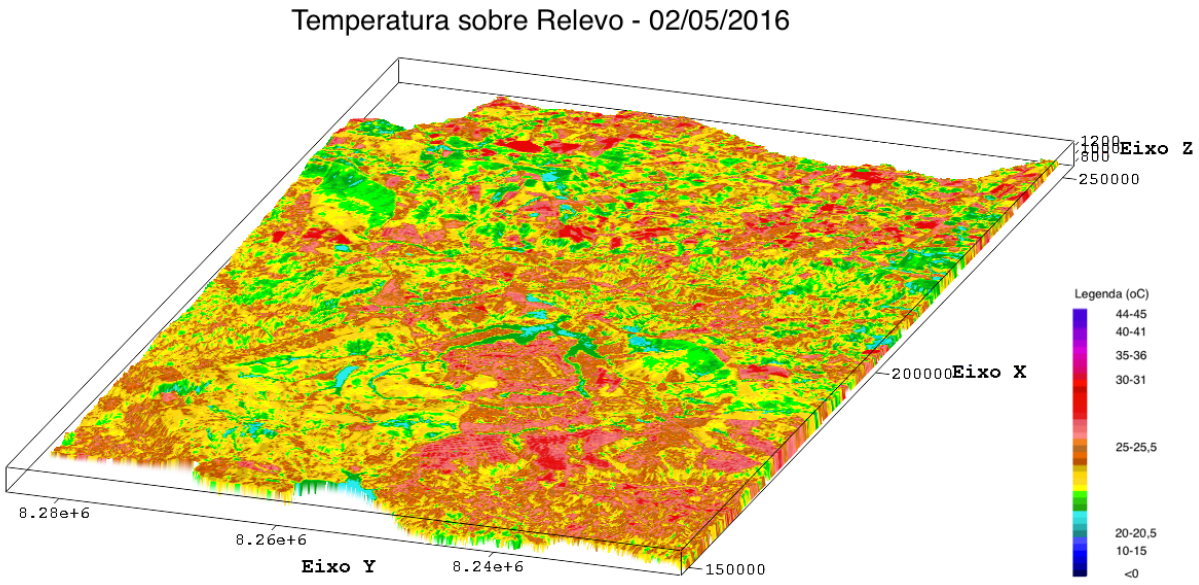


Figura 57: Temperatura sobre relevo para a imagem de 02/05/2016.

Na imagem de 02/05, observa-se um maior contraste entre as temperaturas das várias regiões do DF, com regiões claramente mais quentes nas grandes aglomerações urbanas ao centro e ao sudoeste do DF, onde estão o Plano Piloto, Taguatinga, Samambaia e Recanto das Emas. As regiões agrícolas, apresentam temperaturas mais amenas do que na imagem anterior, sobretudo nas regiões onde se encontram pivôs de irrigação (que aparecem de cor esverdeada), embora se observem pontos mais quentes, onde o solo está exposto.

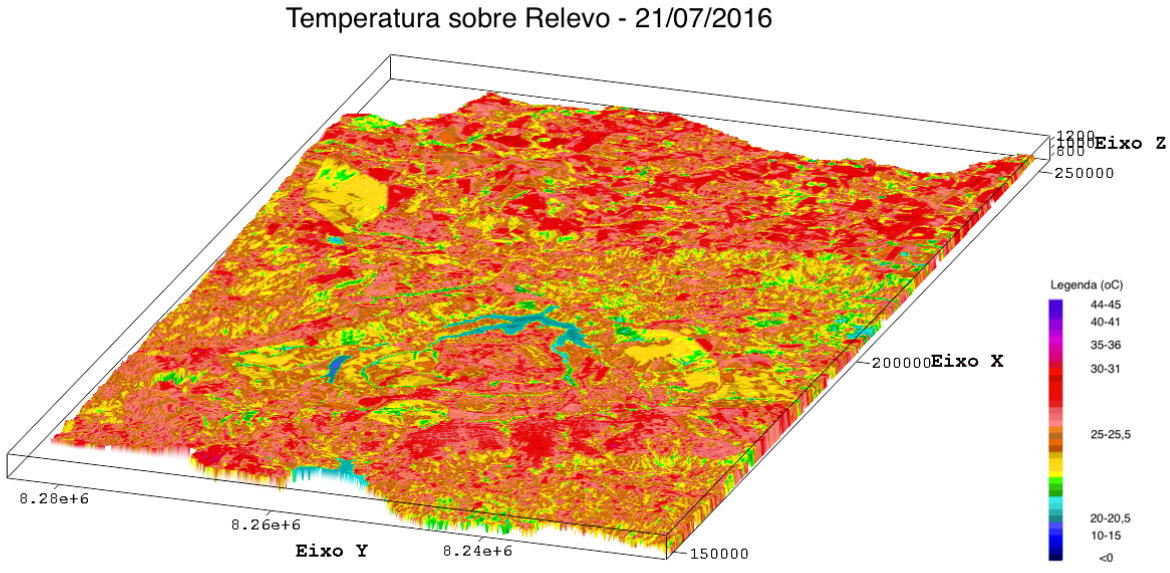


Figura 58: Temperatura sobre relevo para a imagem de 21/07/2016.

Na imagem de 21/07, as temperaturas estão quase homogeneamente altas, de modo que torna mais difícil distinguir entre áreas de maior e menor densidade urbana. Tanto as regiões urbanas quanto as agrícolas estão particularmente quentes, mas destaca-se o lago Paranoá que apresenta temperatura bem inferior à maior parte de suas áreas adjacentes, ao contrário da imagem anterior, em que havia áreas de temperatura mais amena nas margens do corpo hídrico.

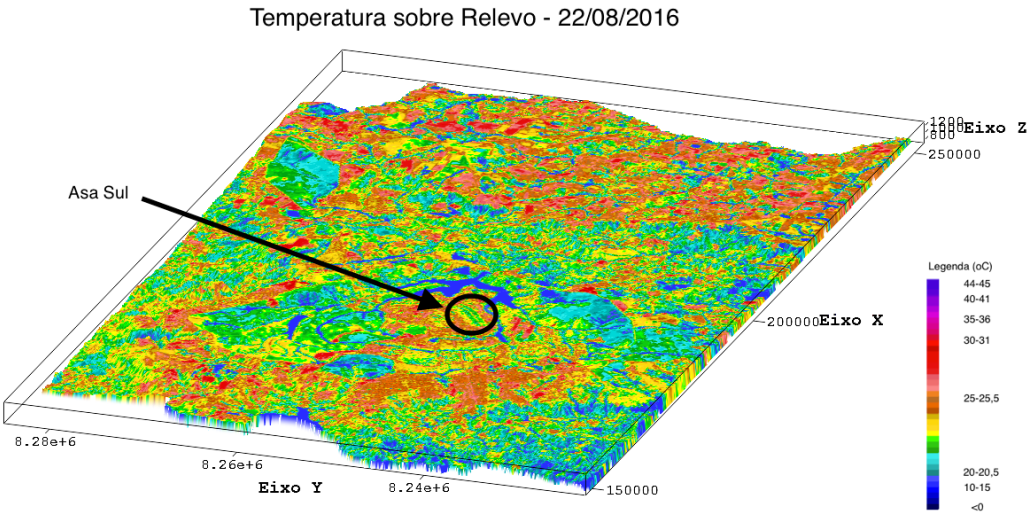
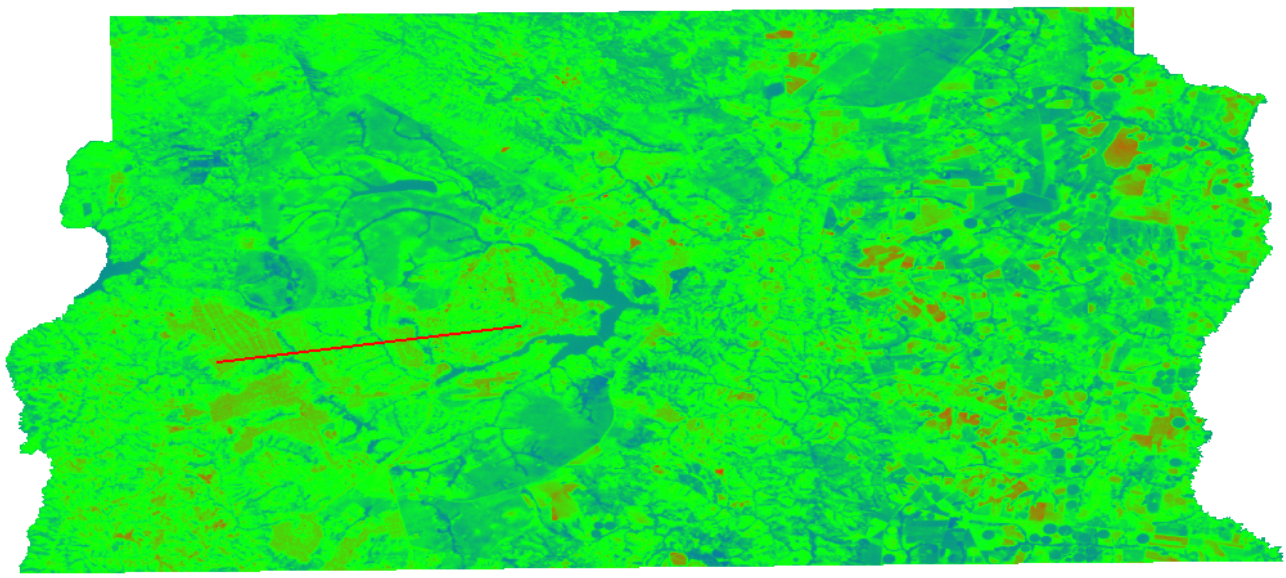


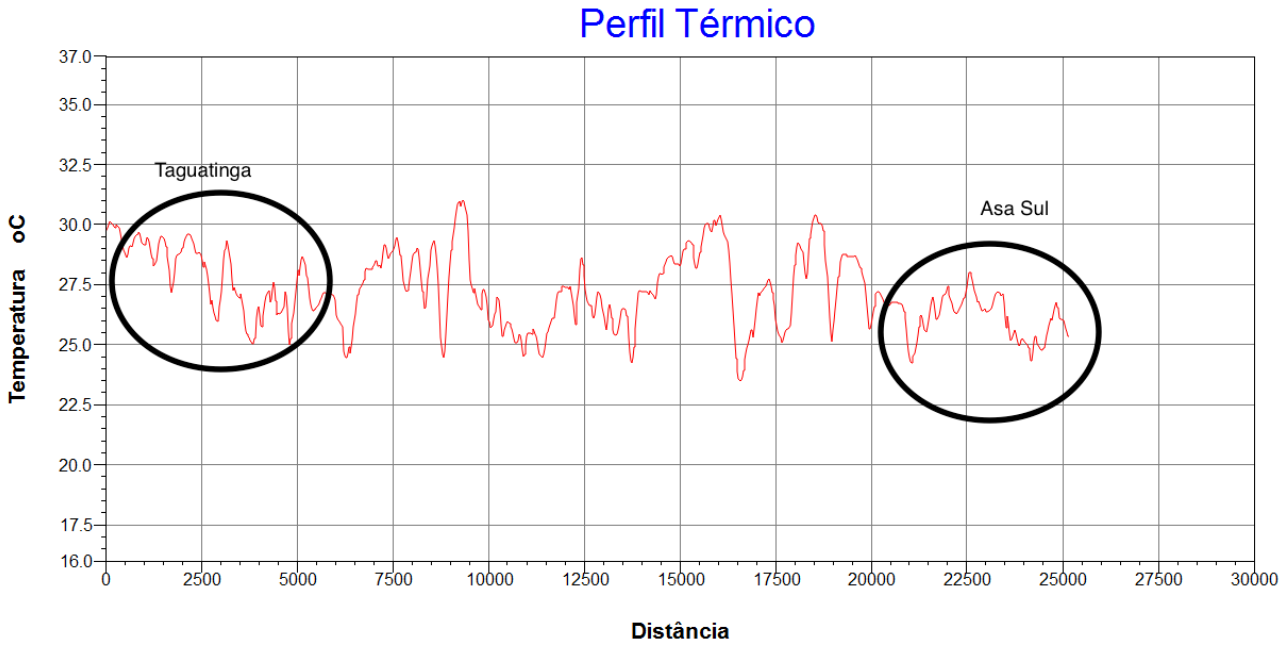
Figura 59: Temperatura sobre relevo para a imagem de 22/08/2016.

No modelo de 22/08, observa-se um maior contraste de temperatura entre diferentes regiões, o que ajuda a marcar aglomerados urbanos no centro e sudoeste do mapa. É notável a baixa temperatura apresentada pela Asa Sul (e também da Asa Norte) em contraste com as regiões quentes à sua volta, formando uma espécie de ilha de calor às avessas, em que regiões de temperatura amena são envolvidas por regiões quentes por todos os lados.

Por fim, foram traçados dois perfis de temperatura nas imagens de 02/05 e 21/07 (Figuras 60 e 61). Buscava-se analisar a variação da temperatura ao longo de uma linha reta observando-se picos e vales e identificando-se certas regiões. O eixo horizontal do gráfico do perfil fornece a distância entre os pontos considerados dada em metros. Nos dois casos, o perfil topográfico foi traçado de oeste para leste (esquerda para direita), que é a direção seguida pelo gráfico gerado.



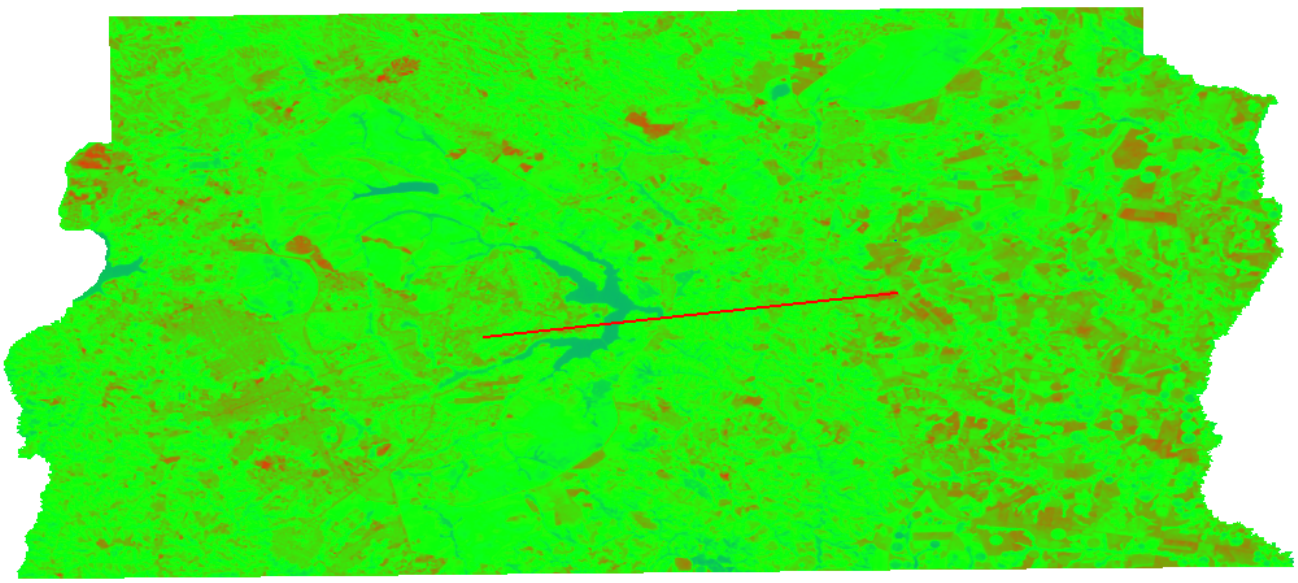
(a) Localização do perfil de temperatura.



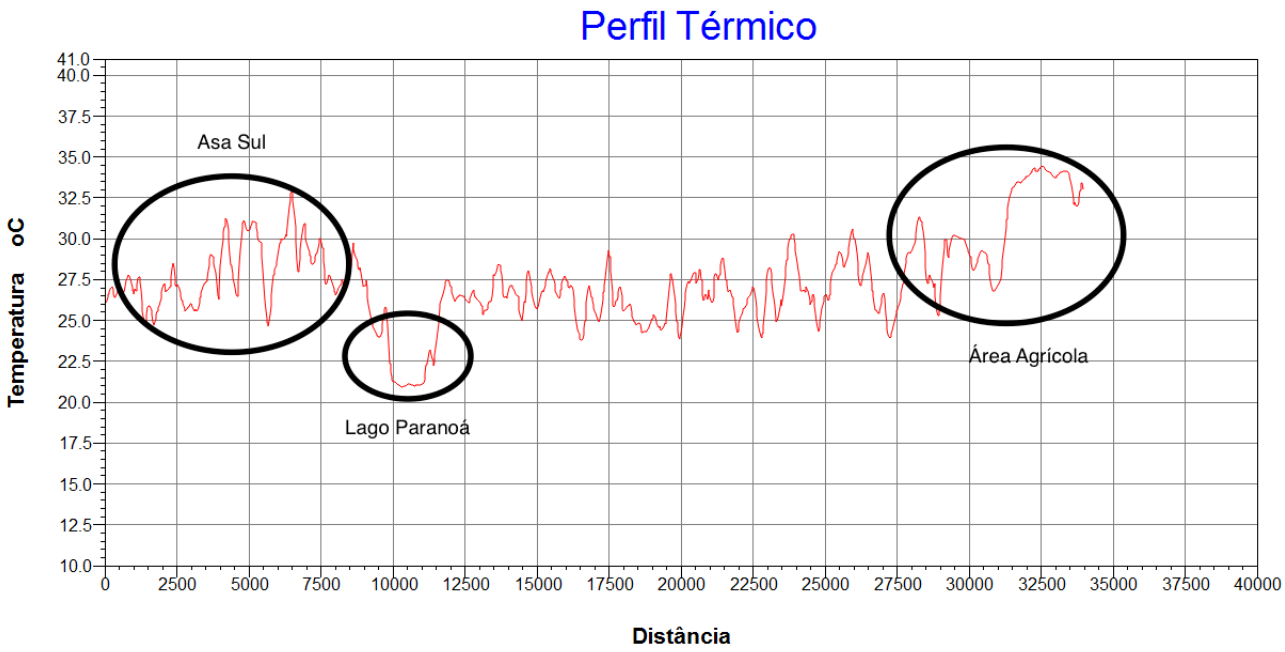
(b) Gráfico do perfil térmico.

Figura 60: Perfil de temperatura para a imagem de 02/05/2016.

Para a data de 02/05, o perfil térmico traçado corta tanto Taguatinga quanto a Asa Sul e permite identificar uma média de temperaturas maior no primeiro bairro do que no segundo. Embora nas duas regiões observem-se picos cercados de vales no perfil térmico, esse comportamento é mais característico na Asa Sul (em que picos e vales suaves e sucessivos tendem a diminuir a temperatura na periferia da região) do que em Taguatinga (em que picos e vales são mais abruptos e não reduzem em maior escala as temperaturas).



(a) Localização do perfil de temperatura.



(b) Gráfico do perfil térmico.

Figura 61: Perfil de temperatura para a imagem de 21/07/2016.

O perfil traçado na imagem de 21/07, é capaz de mostrar três regiões com comportamentos bem distintos: o centro da Asa Sul (em que há oscilações abruptas da temperatura, semelhante ao comportamento de Taguatinga na imagem anterior), o lago Paranoá (que é um platô de baixas temperaturas, formando um tipo de oásis no meio do DF) e as áreas agrícolas (em que as temperaturas sobem rapidamente para valores maiores que os da Asa Sul).

Analisando-se todas as imagens desta seção, é improvável haver qualquer relação entre altitude e temperatura, ao menos no contexto considerado do DF. Vale lembrar que o DF é bem plano, sem grandes amplitudes de variação de altitude (não há nenhum vale muito profundo,

nem montes muito elevados), o que acaba por minimizar quaisquer efeitos térmicos produzidos pelo relevo.

Ainda observa-se que certas microrregiões dentro das áreas estudadas, como a Asa Sul e Taguatinga, apresentam perfil de temperatura que lembra o modelo clássico de uma ilha de calor, inclusive com regiões periféricas com baixas temperaturas entre duas regiões de elevadas temperaturas (o efeito oásis). As temperaturas, porém, apresentam oscilações muitas vezes bruscas dentro desses bairros, de modo que os mesmos não podem ser considerados como modelos ideais de ilhas de calor. Observa-se, ainda, que o DF apresenta urbanização não mono-nucleada ou centralizada, de modo que cada região administrativa (ou sub-região) deve ser considerada separadamente a fim de se estudarem as ilhas de calor.

7 CONCLUSÕES

Terminado o presente projeto, depois da análise dos resultados, pode-se chegar a várias conclusões sobre o comportamento do DF e de certas regiões específicas; algumas das quais já eram esperadas, outras, porém, não.

O DF é um unidade da Federação que se assemelha a uma metrópole em termos espaciais e populacionais/demográficos. Contudo, a divisão do seu território em várias cidades menores (as regiões administrativas ou até microrregiões/bairros dentro dessas), que reflete o processo histórico por meio do qual ele foi ocupado e urbanizado, descaracterizam a formação de uma única cidade em formato centralizado ou circular, em que a concentração urbana tende a ser menos densa e a presença de vegetação maior à medida em que se afasta do centro e se aproxima das periferias; desse modo, o DF como um todo não segue o padrão clássico de uma ilha de calor mono-nucleada.

Como a ocupação do DF foi planejada para algumas regiões e espontânea para outras, seu território apresenta intercalações entre áreas tipicamente urbanas, áreas de preservação ambiental e áreas agrícolas. As aglomerações urbanas apresentam, em geral, temperaturas mais elevadas que o seu entorno; os parques e outras áreas de preservação contribuem para a formação de áreas com temperaturas mais amenas. As áreas agrícolas, por sua vez, apresentam grande variação de temperatura: ficam quentes quando estão com o solo exposto (após a colheita) e tendem a ficar mais frias quanta a cultura está crescendo (as regiões irrigadas tendem a ter maior estabilidade térmica ao longo do tempo).

A combinação dessas três áreas forma uma configuração urbana complexa em que existem picos isolados de altas temperaturas cercados por áreas de temperaturas mais amenas, sendo que os picos estão em geral espaçados por grandes áreas de baixas temperaturas ("oásis"). A caracterização mais própria do DF no que diz respeito a ilhas de calor seria uma cidade poli-nucleada, embora não haja um padrão claro sobre a distribuição espacial dos vários núcleos (por

exemplo, não se observou correlação entre altitude e picos de temperatura).

As várias aglomerações urbanas - que, desconsiderando as áreas rurais, representam a maior parte dos picos de alta temperatura - apresentam, porém, diferentes tipologias urbanas e distintas distribuições de temperatura. De modo geral, as regiões de urbanização mais consolidada como as áreas centrais da cidade (abrangendo toda a região do Plano Piloto e, em especial, a Asa Sul) possuem temperaturas mais amenas, enquanto que as áreas urbanas mais ao oeste e sul do DF (principalmente, Taguatinga e Ceilândia) mostram-se mais quentes.

As visitas de campo feitas para averiguar a tipologia urbana da Asa Sul e de Taguatinga confirmam as possíveis causas do padrão de temperatura observado. Na Asa Sul, há prédios de gabarito mais limitado (nas superquadras, tanto nas áreas comerciais quanto residenciais) que permitem melhor circulação do ar atmosférico, observa-se menor densidade de ocupação e maior arborização, o que permitem a dispersão do calor e da energia eletromagnética infravermelha, evitando a concentração de calor. A região de Taguatinga, por sua vez, apresenta urbanização menos consolidada, com poucas áreas verdes em regiões comerciais e residenciais, maior concentração urbana, e prédios, em geral, mais elevados (embora haja regiões com limite mais estrito de gabarito).

Por fim, a análise da evolução histórica do setor Noroeste confirma o esperado para a urbanização de uma certa área: na medida em que novas áreas são construídas o índice de vegetação (NDVI) tende a decrescer e a temperatura tende a aumentar, como consequência direta. Embora apresente condições construtivas e urbanísticas semelhantes às das Asas Sul e Norte, ainda não se sabe qual será a configuração urbana final do bairro, mesmo que ainda apresente vegetação rasteira entre prédios residenciais e prédios de gabrito limitado, tendo ainda um parque ecológico próximo. O que se espera, porém, é que apresente um comportamento mais próximo da Asa Norte, que, embora com temperaturas mais amenas que Taguatinga/Ceilândia, ainda é mais quente que a Asa Sul.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos de pesquisa futuros, a fim de se complementar o estudo apresentado neste projeto, pode-se analisar as regiões administrativas com mais detalhes, analisando-se imagens com resolução espacial maior, utilizando-se VANT's (Veículos Aéreos Não-Tripulados) capazes de sobrevoar as regiões estudadas e fornecer maiores detalhes sobre a resposta espectral (além de imagens com *pixel* menor) e sobre a configuração urbana das regiões.

Pode-se ainda utilizar outros parâmetros para se analisar o uso do solo e as condições ambientais além do NDVI, como índices de umidade, capazes de indicar a presença de corpos hídricos nas proximidades, e possuidores de uma correlação com a presença de vegetação natural/artificial. Outro tipo de fenômeno a ser associado diretamente às ilhas de calor são as ques-

tões sociais relacionadas à renda média e aos índices de criminalidade, observando-se alguma possível relação de causa e efeito (ou uma mera correlação estatística) entre esses fenômenos e o surgimento de ilhas de calor.

Outra possível correlação entre temperatura e as características naturais que pode ser feita em trabalhos futuros é associação entre as feições pedológicos (dos tipos de solo e rochas) e a temperatura média do solo, uma vez que se observam as feições geológicas nas próprias cartas de temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, G. M. M. (2012). **Sensores Imageadores na Faixa do Termal (8 - 14 μm)**, *in* Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto (2012, org.: Meneses & Almeida). UnB, CNPq. Brasília, Brasil, pp.47-56.

BIAS, E. S., BAPTISTA, G. M. M., LOMBARDO, M. A. (2003) **Análise do Fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas, por meio da combinação de dados LandSat e Ikonos**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003, INPE, p.1741-1748. Disponível em: http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09. 12.18.52/doc/14_005.pdf.

BORGES, F.P.F. (2017). **Processamento de imagens de satélite do Distrito Federal para cálculo de temperatura de brilho de superfície e avaliação sazonal da cobertura do solo**. Relatório de Projeto de Iniciação Científica, Publicação G.PF-005/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Apresentado no 23^o Congresso de Iniciação Científica da UnB e o 14^o do DF no dia 25/10/2017.

CAMARA G., SOUZA, RCM, FREITAS UM, GARRIDO J.(1996) **"SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling"**. Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

JENSEN, JOHN R. (2011) **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Parêntese. São José dos Campos, Brasil.

LOMBARDO, MAGDA A. (1985) **Ilha de Calor nas Metrópoles - O exemplo de São Paulo**. Editora de Humanismo, Ciência e Tecnologia, São Paulo, Brasil.

MENESES, P. R., ALMEIDA, T. (2012) **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** UnB, CNPq. Brasília, Brasil.

SOUZA, N.M., SILVA JUNIOR, E.E.A. (2015). **Comparação da temperatura de brilho de superfície do período seco com o chuvoso no Distrito Federal calculada a partir de imagens do Landsat 8**. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.

SOUZA, N.M., SILVA JUNIOR, E.E.A. (2015). **Uso de imagens Landsat 8 para o cálculo**

de temperatura de brilho de superfície. 9º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, ABGE, Cuiabá, MT, 5 p. "CD-ROM".

Codeplan. **PDAD 2015/2016.** *Site*: https://goo.gl/7yaGW7. Acesso em 12/10/2017.

ESA. ***Sentinel Online*.** *Site*: www.esa.int/. Acesso em 22/04/2017.

INPE. **Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres.** *Site*: www.cbers.inpe.br/. Acesso em 31/03/2017.

USGS. **LandSat Missions, LandSat 8.** *Site*: https://landsat.usgs.gov/landsat-8. Acesso em 20/05/2017.