



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

CARLOS ROBERTO DA SILVEIRA JUNIOR

**MONITORAMENTO AMBIENTAL DA SUPERFÍCIE DA TERRA
UTILIZANDO DADOS DE SATÉLITE DE ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA:
ESTUDO DE CASO COM O METEOSAT SECOND GENERATION**

GOIÂNIA – GO

2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem resarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

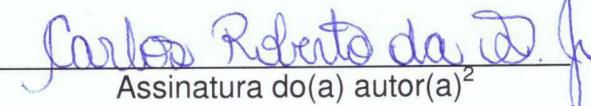
Nome completo do autor: CARLOS ROBERTO DA SILVEIRA JUNIOR

Título do trabalho: MONITORAMENTO AMBIENTAL DA SUPERFÍCIE DA TERRA UTILIZANDO DADOS DE SATÉLITE DE ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA: ESTUDO DE CASO COM O METEOSAT SECOND GENERATION

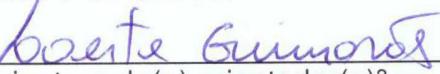
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento **SIM** **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 09/04/2018

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

CARLOS ROBERTO DA SILVEIRA JUNIOR

**MONITORAMENTO AMBIENTAL DA SUPERFÍCIE DA TERRA
UTILIZANDO DADOS DE SATÉLITE DE ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA:
ESTUDO DE CASO COM O METEOSAT SECOND GENERATION**

Tese apresentada ao Programa Multidisciplinar de Doutorado em Ciências Ambientais (CIAMB), da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Estrutura e Dinâmica Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior.

Co-orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

GOIÂNIA – GO

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silveira, Carlos Roberto Junior

Monitoramento da superfície da Terra utilizando dados de satélite de órbita geoestacionária: estudo de caso com o Meteosat Second Generation [manuscrito] / Carlos Roberto Junior Silveira. - 2018.

XIV, 177 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr; co-orientador Dr. Bernardo Barbosa da Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2018.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. satélite geoestacionário. 2. Meteosat-10. 3. NDVI. 4. NDWI. I. Ferreira Jr, Laerte Guimarães, orient. II. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ATA DA DEFESA PÚBLICA DE TESE Nº 002/2018

Aos vinte dias do mês de março do ano de dois mil e dezoito, às 08:00, reuniu-se na Sala Aqua do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG/UFG, Câmpus Samambaia, a Banca Examinadora composta pelos: Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior – CIAMB, o Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira – CIAMB, a Prof.ª Dr.ª Gislaine Cristina Luiz – IESA/UFG, o Prof. Dr. Ivanilton José de Oliveira – IESA/UFG, e o Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira - IESA/UFG para, sob a presidência do primeiro, proceder a defesa da Tese intitulada: **“Monitoramento ambiental da superfície da Terra utilizando dados de satélite de órbita geoestacionária: estudo de caso com o Meteosat Second Generation”**, de autoria de Carlos Roberto da Silveira Junior, discente de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB), área de concentração em Estrutura e Dinâmica Ambiental. Foi realizada a avaliação oral no sistema de apresentação e defesa de tese de autoria do discente. Terminada a avaliação oral, a Banca Examinadora reuniu-se emitindo os seguintes pareceres mediante as justificativas e sugestões abaixo:

Membro da Banca	Parecer (Aprovado/Reprovado)	Assinatura
Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior	Aprovado	<i>Laerte Guimarães</i>
Dr. Nilson Clementino Ferreira	APROVADO	<i>Nilson Ferreira</i>
Dr.ª Gislaine Cristina Luiz	Aprovado	<i>Gislaine Cristina</i>
Dr. Ivanilton José de Oliveira	Aprovado	<i>Ivanilton José de Oliveira</i>
Dr. Manuel Eduardo Ferreira	Aprovado	<i>Manuel Eduardo Ferreira</i>

JUSTIFICATIVAS e SUGESTÕES:

Revisar tese conforme sugestões da banca

Após a avaliação, o referido discente foi considerado Aprovado na defesa de tese. Às 12:30 horas, o Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior, Presidente da Banca Examinadora, deu por encerrada a sessão e, para constar, lavrou-se a presente Ata.

Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira
Membro Titular

Prof.ª Dr.ª Gislaine Cristina Luiz
Membro Titular

Prof. Dr. Ivanilton José de Oliveira
Membro Titular

Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira
Membro Titular

Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior
Presidente

AGRADECIMENTOS

1. À Deus pela oportunidade de vida e aprendizado.
2. Às instituições que viabilizaram esta pesquisa de doutorado: Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB/PRPPG), Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), ao Instituto Federal de Goiás (IFG) pelo afastamento, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pela concessão da bolsa de Doutorado.
3. Aos meus familiares, minhas filhas Lara e Júlia, que ao final do projeto terão seu pai “legal” de volta, à minha esposa Adriana, que sempre me apoiou do jeito dela. Aos meus pais pelo amor e dedicação que me deixaram com autoestima elevada para enfrentar (e procurar) os desafios.
4. Ao professor Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr que me concedeu a oportunidade e apoio para me iniciar em uma nova área de pesquisa. Ao professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva pela co-orientação e sugestões nos artigos.
5. Aos colegas que, a partir de grandes e pequenas ações, contribuíram para tornar possível o desenvolvimento desta pesquisa. Afinal, aos colegas que “deixaram” que eu usasse o seu computador para processar rotinas, ligavam meus computadores para acesso online, explicavam dos pormenores às trivialidades do sensoriamento remoto, discutiam técnicas computacionais, forneciam dicas para imagens, leram meus artigos, dentre várias outras ações.
6. Aos pesquisadores que indiretamente nortearam o desenvolvimento da pesquisa através de suas pesquisas, em especial aos Drs. Simon Proud, do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e Humberto Barbosa da Silva, da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Ao Me. Diego Rodrigo Souza (CPTEC/INPE) pelo auxílio na operacionalização da plataforma de recepção de dados Geonetcast.

TRAJETÓRIA ACADÊMICO-PROFISSIONAL

Minha formação foi impulsionada cedo no curso técnico em eletrônica na antiga ETFG (Escola Técnica Federal de Goiás) (1994 – 1998) e afirmada para a área de tecnológicas na graduação de Engenharia de Computação (1999 - 2003) na UFG (Universidade Federal de Goiás). Durante a graduação comecei trabalhando com manutenção em celulares, mas o desafio era pequeno; por isso, minha carreira durou apenas seis meses. Nesta época, fui convidado para participar de um projeto de agricultura de precisão, cujo resultado culminou no registro de patente¹ e me auxiliou a entrar no mestrado de Engenharia Elétrica e da Computação (2004 - 2006) na UFG. Ao término do mestrado comecei a ministrar aulas em diversas faculdades. Porém, buscando desafios, me ofereci para trabalhar em uma empresa de projetos de automação industrial por um salário mínimo (mais ticket), construindo uma carreira na área. Posteriormente, em 2010, surgiu a oportunidade de ingressar no IFG (Instituto Federal de Goiás) como professor, onde pude desenvolver melhor as habilidades de ensino na educação de jovens e adultos e pesquisa a partir de orientação de iniciação científica e desenvolvimento de projetos. Nessa época, alguns sinais apresentavam a necessidade do ingresso no doutorado, como o sorriso discreto de uma professora de matemática (que eu nunca havia visto sorrir), ao ficar sabendo que sua tese em Ciências Ambientais havia sido premiada², a participação em um projeto tecnológico de nível nacional, o projeto ROBOCETI³, e a orientação de um projeto de iniciação científica premiado nacionalmente⁴. Ingressei, em 2014, no programa de pós-graduação em Ciências Ambientais, com o intuito de investigar o monitoramento ambiental da superfície da Terra a partir de um satélite de órbita geoestacionária, sem saber bem o que isso representava. Porém, seria um desafio interessante. Neste período pude conhecer melhor o sensoriamento remoto e as possibilidades de aplicação nas Ciências Ambientais.

¹ SILVEIRA, C. R.; et al. Sistema para mapeamento da variabilidade espacial da altura do algodoeiro com a finalidade de otimizar a aplicação de reguladores de crescimento. PI 0503248-2 A2, 2005, Brasil.

² COUTO, M. S. D. S. Modelagem Matemática para Seleção de Áreas Prioritárias para Conservação: Métodos, Cenários e Contribuições para a Gestão Territorial em Goiás e Distrito Federal, doutorado (Ciências Ambientais), 2009. Orientado pelo Dr. Laerte Guimarães. Outorgado com Menção Honrosa, no âmbito do Prêmio Capes de Tese, Edição 2010, na Área Interdisciplinar.

³ Projeto ROBOCETI - Robótica como Instrumento de Capacitação dos Institutos Federais em Ciência, Educação, Tecnologia e Inovação. O projeto envolveu diversos Institutos Federais do Brasil, coordenado pela UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e financiado pela SETEC (Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica).

⁴ ALVES, A. R. Telemetria no monitoramento e controle do ambiente de psicultura. 11º Prêmio Destaque na Iniciação Científica e Tecnológica, categoria Bolsista de Iniciação Tecnológica, da área de Ciências Exatas, da Terra e Engenharias, CNPq, 2013.

RESUMO

Silveira Junior, Carlos Roberto. **Monitoramento Ambiental da Superfície da Terra utilizando dados de Satélite de Órbita Geoestacionária: Estudo de Caso com o Meteosat Second Generation.** 2018. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Programa em Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2018.

Satélites de órbita geoestacionária, comumente utilizados para o monitoramento meteorológico, fornecem, em novas séries, possibilidades de monitoramento ambiental da vegetação, tendo como vantagem maior resolução temporal quando comparado a dados de satélites de órbita polar. Porém, é necessário conhecer características e limitações do dado para, assim, obter os indicadores biofísicos. Para tanto, a proposta deste trabalho é investigar e conhecer o potencial de indicadores ambientais para monitoramento da superfície da Terra a partir de dados de satélite de órbita geoestacionária, especificamente o Meteosat-10 da série MSG (*Meteosat Second Generation*), com vistas a valorar suas características temporal e espacial. Para tanto, buscou-se identificar os desafios inerentes para obtenção de indicadores biofísicos para o Brasil, o qual apresenta como principal limitação o alto ângulo de visada. Objetivou-se, ainda, analisar os resultados de técnicas de correção (geométrica e atmosférica) e fusão de bandas para aumentar a correlação do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) MSG com o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Em seguida, com o intuito de identificar o potencial dos dados, os indicadores NDVI e NDWI (*Normalized Difference Water Index*) foram utilizados para o monitoramento da sazonalidade ambiental de bacias hidrográficas. O período da base de dados de estudo foi de 2013 a 2015. Como resultado, o NDVI MSG obtido no intervalo de 10:00 h às 12:00 h apresenta alta correlação ($p > 0,8$) com o MOD09, sendo capaz de obter uma imagem sobre o estado de Goiás com 95% de cobertura de pixels, no intervalo de 12 dias, enquanto o MOD09 obtém no intervalo de 16 dias. Porém, a máscara de nuvens do MSG apresenta alta porcentagem de erro (21%), ao indicar nuvem quando os pixels MOD09 marcam toda a área como livre de nuvem. O uso da banda pancromática, na operação de fusão de bandas, não agregou melhorias aos resultados. Da mesma forma, a correção geométrica é um ajuste fino que, nestas análises, não apresentou aumento significativo da correlação dos dados. Por outro lado, a correção atmosférica mantém a correlação dos dados e aumenta o valor do NDVI, aproximando mais ao valor NDVI MODIS. Em uma análise de componentes principais e classificação não-supervisionada o NDVI MSG foi superior ao NDVI MOD13, com concordância substancial para agricultura anual ($K = 0,73$) e considerável para pastagem ($K = 0,35$) e vegetação natural ($K = 0,34$). Ao analisar a sazonalidade de bacias hidrográficas pode-se identificar e compreender padrões sazonais em diferentes regiões e classes de uso. O NDVI e o NDWI apresentaram maior correlação com a precipitação de dois meses anteriores ($r > 0,84$) e alta correlação entre si ($r > 0,94$), sendo que o NDWI apresenta maior sensibilidade na abstração do comportamento sazonal, permitindo identificar tendências de menor estresse hídrico em determinadas bacias do estado de Goiás. Os resultados demonstram o potencial de indicadores biofísicos de vegetação a partir de dados do satélite geoestacionário Meteosat-10 para o monitoramento da cobertura da Terra.

Palavras-chave: satélite geoestacionário, Meteosat-10, NDVI, NDWI.

ABSTRACT

Silveira Junior, Carlos Roberto. **Monitoramento Ambiental da Superfície da Terra utilizando dados de Satélite de Órbita Geoestacionária: Estudo de Caso com o Meteosat Second Generation.** 2018. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Programa em Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2018.

Satellites of geostationary orbit, commonly used for meteorological monitoring, provide, in new series, the possibility of environmental monitoring of the vegetation, having the advantage of greater temporal resolution, when compared to polar orbiting satellite data. However, it is necessary to know the characteristics and limitations of the data in order to obtain the biophysical indicators. Therefore, the purpose of this work is to investigate and to know the potential of environmental indicators to monitor the surface of the earth from geostationary orbit satellite data, specifically Meteosat-10 of the MSG (Meteosat Second Generation) series, with a view to assess their temporal and spatial characteristics. In order to do so, we sought to identify the inherent challenges for obtaining biophysical indicators for Brazil, which has as main limitation the high viewing angle. As well as, analyzing the results of correction techniques (geometric and atmospheric) and band fusion to increase the correlation of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) with MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). In order to identify the potential of the data, the NDVI and NDWI (Normalized Difference Water Index) indicators were used to monitor the environmental seasonality in the basin scale. The study database period was from 2013 to 2015. As a result the NDVI MSG, obtained in the interval from 10:00 to 12:00 am, presents a high correlation ($p > 0.8$) with the MOD09, being able to obtain an image about the state of Goiás with 95% coverage of pixels in the interval of 12 days, while the MOD09 obtains in the interval of 16 days. However, the MSG cloud mask presents a high percentage of error (21%), showing cloud when the MOD09 pixels mark the entire area as cloud-free. The use of the panchromatic band in the band fusion operation did not add to the results. Likewise, the geometric correction is a fine adjustment that, in these analyzes, did not present an increase in the correlation of the data. On the other hand, the atmospheric correction maintains the correlation of the data and increases the value of the NDVI, approaching more to the value NDVI MODIS. In an analysis of major components and unsupervised classification the NDVI MSG was superior to NDVI MOD13, with substantial agreement for annual agriculture ($K = 0.73$) and considerable for pasture ($K = 0.35$) and natural vegetation ($K = 0.34$). By analyzing the seasonality of river basins, one can identify and understand seasonal patterns in different regions and classes of use. The NDVI and NDWI presented a higher correlation with the precipitation of two months ago ($r > 0.84$) and high correlation with each other ($r > 0.94$), with NDWI being more sensitive to the abstraction of seasonal behavior, allowing identification tendencies in some basin of Goias state. The results demonstrate the potential of biophysical vegetation indicators from geostationary satellite Meteosat-10 to monitor the land cover.

Keywords: gestational sattelite, Meteosat-10, NDVI, NDWI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Área de visada dos satélites de plataforma geoestacionária ao redor da Terra. Respectivamente, da esquerda para a direita, tem-se o GOES-W (130° oeste), GOES-E (98° oeste), MSG (0° oeste), FY-2 (86° leste), INSAT (94° leste), COMS (128° leste).	28
Figura 2.2. Mapa de representação da área de visada das imagens dos satélites Meteosat-9 (vermelho) e Meteosat-10 (verde). A estrela vermelha representa a posição de cada satélite sobre o Equador.....	29
Figura 2.3. A Terra vista pelo Meteosat-10 na composição RGB (canais 1, 2, 3).	31
Figura 3.1. Características de reflexão da superfície devido à variação geométrica de iluminação solar e visada do satélite, sendo (a) dispersão para trás com a presença de hotspot na região central e (b) dispersão para frente.....	66
Figura 3.2. Comportamento no tempo dos ângulos de observação (direita) e reflectância dos canais RED e NIR e o NDVI (esquerda) durante o dia de uma amostra do satélite MSG em uma área de agricultura anual sem contaminação de nuvens no município de Chapadão do Céu, estado de Goiás, dia 02/03/2014, intervalo de 10:00 h às 13:15 h horário de Brasília. Sendo os ângulos zenithal e azimuthal de visada VZA e VAZ, respectivamente, e os ângulos zenithal e azimuthal solar SZA e SAZ, respectivamente....	67
Figura 3.3. Ilustração das interações da radiação solar com a atmosfera e superfície do solo. Adaptado de Trenberth et al. (2009).	68
Figura 3.4. Resolução espacial de um pixel MSG (3 x 3 km) com predominância de pastagem, comparado ao produto NDVI do MODIS (250 x 250 m) em área correspondente. Utilizou-se a classificação do TerraClass Cerrado 2013 (BRASIL, 2013), dados topográficos SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) com exagero topográfico (x3).	72
Figura 3.5. Mapa da variação do ângulo de visada, em graus, do MSG (MSG VZA) para o Brasil, excluindo áreas não cobertas devido ângulo de visada maior do que 75°, correspondentes ao estado do Acre e oeste do Amazonas.....	73
Figura 3.6. Ilustração da variação do GIFOV (<i>Ground Instantaneous Field of View</i>) do MSG para um pixel no nadir (VZA = 0°), com resolução espacial de 3 x 3 km, e outro a 0° de latitude e 55° de longitude (VZA = 55°) com 6,1 x 3,3 km.	74

Figura 3.7. Dinâmica da varredura da banda Pancromática do MSG sobre o Brasil no intervalo de 11:00 h às 14:00 h, horário de Brasília, excluindo estado do Acre e oeste do Amazonas.	77
Figura 3.8. Comparação visual entre os canais (a) RED (vermelho), (b) NIR (infravermelho próximo), (c) SWIR (infravermelho de ondas curtas) e (d) PAN (pancromática) dos satélites MSG, MODIS e Landsat-8.	78
Figura 4.1. Área de estudo, sendo: o estado de Goiás, incluindo Distrito Federal, dentro do Bioma Cerrado, no Brasil (a); ângulo de visada do MSG para a área de estudo (b); ilustração de diferenças entre um pixel a nadir e de alto ângulo de visada (c).	91
Figura 4.2. Fluxograma da metodologia utilizada para obter e avaliar o NDVI MSG. ..	92
Figura 4.3. Média mensal de amostras para o NDVI MSG (a) e NDVI MOD09 (b) de 2013 a 2015.	100
Figura 4.4. Porcentagem de cobertura nos intervalos de 1 a 20 dias para o NDVI MSG no período de seca (a) e chuva (b), bem como para todo o ano (c) comparado ao NDVI MOD09 (d) de 2013 a 2015. Os retângulos (em azul) estão sobre a área de alta cobertura (maior do que 95%).	100
Figura 4.5. Comparação da máscara de nuvens do MSG e MODIS (MOD09) para condições de pixels marcados como sem cobertura de nuvens (à esquerda) e com cobertura de nuvens (à direita) para o MSG. Para os dados MODIS são considerados os pixels dentro da área do pixel MSG e os valores foram divididos nas seguintes categorias de cobertura de nuvens do produto MODIS: muito alto (maior do que 75%), alto (entre 75% e 50%), médio (entre 50% e 25%) e baixo (menor do que 25%), nos meses e média dos anos de 2013 a 2015 para a área de estudo.....	101
Figura 4.6. Série temporal de agricultura anual (à esquerda), localizado no município de Rio Verde, e pastagem (à direita), localizado no município de Mundo Novo, para o NDVI MSG (com ou sem correções) e o NDVI MOD09 e MOD13, sendo o dado reprojetado, utilizando convolução cúbica, e remostrado para 3 km, para o período 09/2013 a 09/2014. Foram utilizadas as siglas 6S para correção atmosférica e BRDF para correção geométrica.....	103
Figura 4.7. Diagrama de dispersão do NDVI MSG em relação ao NDVI MOD13, sendo o dado reprojetado, utilizando convolução cúbica, e remostrado para 3 km, sem correção geométrica e atmosférica (a), com correção geométrica (BRDF) (b), com correção atmosférica (6S) (c) e com correção atmosférica (6S) e geométrica (BRDF) (d) no período 2013 a 2015.....	104

Figura 4.8. Imagens de composição no período de 12 dias (01/01/2013 a 13/01/2013) do NDVI MSG sem aplicação de técnicas (a) e apenas com fusão de bandas (b), correção geométrica (c) ou correção atmosférica (d).....	105
Figura 4.9. Série temporal do NDVI MSG (a) e NDVI MOD13 (b) em intervalos de 12 e 16 dias, respectivamente, em meses de estação chuvosa. O código no canto inferior direito de cada imagem corresponde ao doy (dia do ano) inicial da composição, os dados são do ano de 2013. Foram aplicados filtros de nuvens em ambos os produtos, utilizando o produto máscara de nuvens para o MSG e o pixel reliability, considerando apenas pixels de alta qualidade, para o MODIS.....	106
Figura 4.10. Gráfico da primeira componente principal do NDVI MSG e MOD13 durante o ano.	107
Figura 4.11. Imagem das três primeiras componentes principais para o MSG (a) e MOD13 (b) sendo representadas em três bandas PC1 (cor vermelho), PC2 (cor verde) e PC3 (cor azul).....	107
Figura 4.12. Distribuição dos pixels da área de estudo, em porcentagem das classes TerraClass 2013, dado as classes obtidas com k-médias para as três primeiras componentes principais do MSG (a) e MODIS (b). Sendo 100% o total de pixels de cada classe.	108
Figura 4.13. Matrizes de correlação das principais classes TerraClass 2013 com MSG (a), MODIS (b) e entre MODIS e MSG (c), organizado em colunas. Sendo 100% o total de pixels para a área de estudo.	109
Figura 4.14. Mapa das principais classes de uso do solo da área de estudo TerraClass 2013 reprojetado e reamostragem para 3 km (a) e resultados obtidos a partir de processamento das técnicas de componentes principais e k-médias com dados MSG (b) e MOD13 (c), para o período 2013 a 2015.....	109
Figura 5.1. Área de estudo subdividida em Ottobacias nível 5, classificadas conforme predominância de uso do solo (maior do que 50% da área) conforme Mapa TerraClass 2013 (MMA, 2015).	130
Figura 5.2. Diagrama da metodologia do trabalho, destacando processos em resolução temporal de 12 dias e mensal. Os retângulos representam bases de dados (azuis), processos (cinzas) e resultados avaliados (verdes).....	131
Figura 5.3. Médias mensais do NDVI (a) e NDWI (b) e precipitação (mm) (c) para a área de estudo no período de 2013 a 2015. O número na parte inferior direita de cada mapa corresponde ao mês de referência.	136

Figura 5.4. Gráficos de séries temporais em bacias com predominância de agricultura (a), pastagem (b), vegetação natural (c) e mistura (d) para os indicadores NDVI, NDWI e precipitação normalizada.....	137
Figura 5.5. Gráficos de dispersão do (a) NDVI ($t+2$) x precipitação (t), (b) NDWI ($t+2$) x precipitação (t) e (c) NDWI x NDVI.....	138
Figura 5.6. Imagens resultantes do cálculo do SPI, SVI e SWI com resolução temporal de 12 dias para os anos de 2013 (a), 2014 (b) e 2015 (c). Foram escolhidas imagens do período de estação chuvosa (<i>doy</i> 85) para o SVI e SWI, sendo a imagem de precipitação defasada em dois meses (<i>doy</i> 025).	139
Figura 5.7. Mapas do SPI (<i>Standardized Precipitation Index</i>) (a), SVI (<i>Standardized Difference Vegetation Index</i>) (b), SWI (<i>Standardized Difference Water Index</i>) (c) ilustrando a tendência de aumento ou diminuição do valor do indicador a partir do coeficiente angular obtido pelo método dos mínimos quadrados.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Informações dos canais do sensor SEVIRI, à bordo do MSG, com principais aplicações de cada canal. Fonte: Schmetz et al. (2002).....	30
Tabela 2.2. Tabela de pesquisas relacionadas a Parâmetros Meteorológicos, a partir da série Meteosat, com informações sobre aplicações relacionadas.....	31
Tabela 2.3. Tabela de pesquisas relacionadas à Detecção e Classificação com dados da série MSG, especificando o foco de estudo.....	35
Tabela 2.4. Tabela de produtos disponibilizados pela EUMETSAT para o satélite Meteosat-10. Fonte: (EUMETSAT, 2016).....	39
Tabela 2.5. Tabela de características das pesquisas com área de estudo no Brasil, desenvolvidas por pesquisadores de instituições do Brasil, no período de 2006 a 2015.	43
Tabela 4.1. Resultado dos testes do NDVI MSG de diferentes intervalos do dia considerando critérios de correlação com o NDVI MOD09 ($r > 0,80$), amostragem mensal (dias/mês > 15) e pixel sem leitura (pixels/mês < 30).	99
Tabela 4.2. Correlação estatística do NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h sem fusão de bandas e com fusão de bandas, utilizando imagens pancromáticas nos intervalos de 14:00 h às 15:00 h e 14:00 h às 16:00 h, comparado ao NDVI MOD09 para o total de amostras e separado para as diferentes classes de uso do solo (agricultura anual, pastagem e paisagem natural).....	102
Tabela 4.3. Correlação estatística do NDVI MSG (sem e com correções) com o NDVI MOD09 (resolução de 500 m) e MOD13 (resoluções de 250 m e 3 km) no período de 2013 a 2015.	103
Tabela 5.1. Indicadores normalizados e respectivas referência e fórmula.....	133
Tabela 5.2. Correlação entre a precipitação no tempo (t) e os indicadores NDVI e NDWI no mesmo tempo (t) e à posteriori nos tempos (t + 1), (t+2) e (t+3).	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

6S	<i>Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum</i>
ABI	<i>Advance Baseline Imager</i>
AMSU	<i>Atmospheric Microwave Sounder Unit</i>
AOT	<i>Tropospheric Aerosol Optical</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>
CALIOP	<i>Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization</i>
CALIPSO	<i>Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations</i>
CLM	<i>Cloud Mask</i>
CMA	<i>China Meteorological Administration</i>
COMS	<i>Communication, Ocean and Meteorological Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUMETCAST	<i>EUMETSAT's Multicast Distribution System</i>
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
FIR	<i>Active Fire Monitoring</i>
GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbiting</i>
GIFOV	<i>Ground Instantaneous Field Of View</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GOES-R	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite R-Series</i>
HPF	<i>High Pass Filter</i>
HRIT	<i>High-Rate Image Transmission</i>
INMET	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field Of View</i>
INSAT	<i>Indian Satellite</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
JAXA	<i>Japanese Aerospace eXploration Agency</i>
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
LAPIG	<i>Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento</i>
LEO	<i>Low Earth Orbiting</i>
LMVM	<i>Local Mean and Variance Matching</i>
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
LUT	<i>Look-Up Table</i>
MATOPIBA	Acrônimo de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
MCV	<i>Maximum Value Composite</i>
MFS	<i>Meteosat First Generation</i>
MLP	<i>MultiLayer Perceptron</i>
MODIS	<i>MODerate Image Spectroradiometer</i>
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
NBAR	<i>BRDF-Adjusted Reflectance</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
NIR	Banda espectral do infravermelho próximo
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
OZ	<i>Ozônio</i>
POES	<i>Polar Operational Environmental Satellite</i>

PROBIO	Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira
RED	Banda espectral do vermelho
RFSA	<i>Russian Federal Space Agency</i>
SAF	<i>Satellite Application Facilities</i>
SAFNWC	<i>Nowcasting Satellite Applications Facility</i>
SEVIRI	<i>Spinnig Enhanced Visible and Infrared Imager</i>
SMAC	<i>Simplified Method for Atmospheric Correction</i>
SPI	<i>Standard Precipitation Index</i>
SPOT-VEG	<i>Satellite Pour l'Observation de La Terre Vegetation</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>
SVI	<i>Standard Vegetation Index</i>
SWI	<i>Standard Water Index</i>
SWIR	Banda espectral do infravermelho de ondas curtas
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFG	Universidade Federal de Goiás
WV	<i>Water Vapor</i>
LIDAR	<i>Light Detection and. Ranging</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO	15
1.1. Introdução	17
1.2. Questões Investigativas	20
1.3. Hipóteses	20
1.4. Objetivo Geral	20
1.5. Objetivos específicos	21
1.6. Referências	21
CAPÍTULO 2: REVISÃO DE APLICAÇÕES COM A SÉRIE METEOSAT SECOND GENERATION	25
2.1. Introdução	25
2.2. Materiais e Métodos	27
2.3. Sistemas de Órbita Geoestacionária	27
2.4. A Série Meteosat Second Generation	28
2.4.1. Temperatura da superfície do solo	32
2.4.2. Temperatura da superfície do mar	32
2.4.3. Radiação solar	33
2.4.4. Vapor de água atmosférico	33
2.4.5. Precipitação	33
2.4.6. Aerossol	34
2.4.7. Poeira	34
2.2. Detecção e classificação	35
2.5.1. Nuvens	35
2.5.2. Anomalias termais	37
2.5.3. Vegetação	37
2.2. Especificidades do MSG	39

2.6.1.	Produtos	39
2.6.2.	A sinergia entre satélites	40
2.6.3.	A validação de dados	41
2.6.4.	Utilização e perspectivas do MSG no Brasil	42
2.2.	Conclusão	45
2.3.	Referências	45
CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS DE GERAÇÃO DO NDVI PARA O BRASIL A PARTIR DE DADOS DO SATÉLITE DE ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA METEOSAT-10		62
3.1.	Introdução	62
3.2.	O NDVI e as influências das condições geométricas e atmosféricas	65
3.3.	Histórico do NDVI MSG	69
3.4.	Desafios para geração do NDVI MSG para o Brasil	71
3.4.1.	Baixa resolução espacial	71
3.4.2.	Visada sobre o Brasil	73
3.4.3.	Correções atmosférica e geométrica	74
3.4.4.	Características da imagem pancromática	76
3.4.5.	Características dos canais espectrais	77
3.5.	Conclusão	78
3.6.	Referências	80
CAPÍTULO 4: AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PARA MELHORIA DA QUALIDADE DO NDVI MSG PARA O MONITORAMENTO DA SUPERFÍCIE DO SOLO		88
4.1.	Introdução	89
4.2.	Materiais e Métodos	90
4.2.1.	Seleção de subintervalo e obtenção do NDVI MSG diário	92
4.2.2.	Fusão de bandas	93
4.2.3.	Correção geométrica	95
4.2.4.	Correção atmosférica	96
4.2.5.	Avaliação dos resultados	97
4.2.6.	Aplicação do NDVI MSG	97

4.3. Resultados	99
4.4. Discussão	109
4.5. Conclusão	117
4.6. Referências	119
CAPÍTULO 5: MONITORAMENTO DA SUPERFÍCIE DO SOLO USANDO DADOS DE SATÉLITE DE ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA	125
5.1. Introdução	126
5.2. Área de estudo	129
5.3. Metodologia	130
5.4. Resultados	134
5.5. Discussão	140
5.6. Conclusão	144
5.7. Referências	145
CONCLUSÕES	151
CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
APÊNDICES	155
Apêndice A: Material suplementar do capítulo 4	155
A.1 Diagrama ampliado	155
A.2 Técnicas de fusão de bandas	155
A.3 Correção geométrica	159
A.4 Look-up Table 6S	162
A.5 Resultados da técnica de componentes principais	164
Apêndice B: Tutorial sistema Geonetcast	166
B.1 Instalação da plataforma de hardware	166
B.2 Instalação da plataforma de software	167
B.3 Configuração de recepção de arquivos	171
B.4 Script para obtenção do NDVI MSG e RED GOES-16	173

Capítulo 1 : Apresentação

A presente tese de doutorado compreende artigos científicos e apêndices, e está organizada da seguinte forma:

- 1) *Introdução*, composta de uma descrição geral do tema tratado na tese, i.e. a problematização apresentada em forma de questões científicas, bem como as hipóteses e os objetivos;
- 2) *Revisão da literatura*, que compreende um artigo, o primeiro da tese, que apresenta uma revisão de artigos relacionados a aplicações ambientais a partir de dados do satélite de órbita geoestacionário utilizado nesta pesquisa;
- 3) *Desenvolvimento*, que compreende três artigos, os três últimos da tese, resultados diretos da pesquisa e relacionados às questões científicas centrais;
- 4) *Considerações gerais*, onde são integrados todos os resultados obtidos no desenvolvimento da tese.
- 5) *Apêndices*, sendo A) Material Suplementar do artigo 4, que compreende resultados obtidos, porém suplementares ao artigo, de técnicas apresentadas e utilizadas; e B) Tutorial Sistema Geonetcast que compreende todo o processo realizado para instalação e utilização da plataforma Geonetcast no LAPIG (Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento) para obtenção de indicadores ambientais.

O primeiro artigo da tese é intitulado “Revisão de aplicações com a série Meteosat Second Generation” e apresenta um estudo de revisão sobre aplicações ambientais de satélites de órbita geoestacionária, especificamente o MSG (*Meteosat Second Generation*) no mundo e no Brasil, buscando identificar como o satélite vem sendo utilizado pela comunidade acadêmica em pesquisas científicas, identificando características, aplicações em estimativa de variáveis meteorológicas, detecção e classificação, bem como tendências futuras. O artigo foi elaborado durante a disciplina de “Oficinas em Análise Ambiental” que integra parte das atividades obrigatórias do Doutorado em Ciências Ambientais.

O segundo artigo da tese é intitulado “Características e desafios de geração do NDVI para o Brasil a partir de dados do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10” e apresenta uma revisão sobre o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) MSG, bem como discute as características e principais desafios para obtenção do produto com melhor qualidade para o Brasil. Para tanto, são apresentadas as particularidades da influência das condições geométricas e atmosféricas sobre as bandas utilizadas para

obtenção do NDVI, o histórico do desenvolvimento do NDVI MSG e uma discussão sobre os principais desafios para obtenção do NDVI MSG para o Brasil, que estão relacionados às características de baixa resolução espacial, alto ângulo de visada, correções atmosférica e geométrica e características da imagem pancromática e dos canais espectrais.

O terceiro artigo da tese é intitulado “Avaliação de técnicas para melhoria da qualidade do NDVI MSG para o monitoramento da superfície do solo”, o qual avalia dados do satélite Meteosat-10 para obtenção do índice de vegetação NDVI com qualidade em regiões de alto ângulo de visada, tendo como área de estudo o estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal. Neste trabalho, as imagens MODIS (*MODerate Image Spectroradiometer*) são utilizadas como referência para identificar as características temporais das observações para composição do produto e avaliar a performance de técnicas como fusão de bandas, correção geométrica e correção atmosférica com o intuito de melhorar a qualidade do dado.

O quarto artigo da tese é intitulado “Monitoramento da superfície do solo usando dados de satélite de órbita geoestacionária”. Neste trabalho foram avaliadas a capacidade de indicadores biofísicos NDVI e NDWI (*Normalized Difference Water Index*), provindos do satélite Meteosat-10, para o monitoramento da sazonalidade ambiental da vegetação das bacias hidrográficas do estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal, no período 2013 a 2015.

Os dois primeiros artigos da tese foram submetidos à revista científica Revista Brasileira de Geografia Física.

1.1. Introdução

O sensoriamento remoto permite o monitoramento ambiental por meio de indicadores, muitos deles oriundos, desde a década de 1970, de plataformas de satélites artificiais de órbita polar e geoestacionária (Meneses e Almeida, 2012). Ademais, com o amplo desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, foi possível ampliar as plataformas disponíveis de sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental da superfície da terra (Melesse et al., 2007; Jones e Vaughan, 2010). Alternativas, antes experimentais, como nano satélites (Kramer e Cracknell, 2008), ou militares, como os drones (Keane e Carr, 2013), já se mostram comercialmente viáveis e operacionais (Selva e Krejci, 2012; Colomina e Molina, 2014; Salamí et al., 2014).

Essas plataformas apresentam como principal diferença, ao que se referem às imagens obtidas pelos sensores, as escalas de resolução espacial e temporal. A escolha de utilização de cada uma dessas alternativas deve considerar especificidades como, por exemplo, custos (operacional e de utilização), estabilidade e precisão (sensores e produtos) e usabilidade (acadêmica e comercial). Assim, em estudos ambientais, com o intuito de melhor compreender o ritmo dos processos da superfície, e as formas presentes na paisagem, é fundamental identificar as escalas temporal e espacial para análises ambientais (Francisco, 2011), para então avaliar quais as alternativas viáveis de plataforma de dados de sensoriamento remoto.

Historicamente, o sensoriamento remoto da superfície terrestre tem se baseado no uso de sensores instalados em satélites de órbita polar (Meneses e Almeida, 2012). Esses conjuntos de sensores incluem o NOAA-AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer*), a série POES (*Polar Operational Environmental Satellite*), o SPOT-VEG (*Satellite Pour l'Observation de la Terre Vegetation*), o sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*), a série Landsat, entre outros (Xie et al., 2008).

Porém, plataformas de satélites orbitais geoestacionários, tradicionalmente voltados para a detecção e acompanhamento de fenômenos atmosféricos e condições de tempo severas, têm sido cada vez mais utilizadas para o monitoramento das dinâmicas da superfície. Os satélites de órbita geoestacionária, quando comparados a satélites de órbita polar, apresentam características de alta resolução temporal e baixa resolução espacial. Devido à baixa resolução espacial, pode-se pensar que o dado seja inútil para monitoramento da superfície da terra. Entretanto, percebe-se seu potencial em escalas

geográficas menores, tendo como vantagem, comparado a satélites de órbita polar, a maior resolução temporal. Ademais, a observação da superfície em diferentes condições de iluminação solar (ângulos zenithal e azimuthal solar) permite maior conhecimento das características da vegetação (Fensholt et al., 2006).

A utilização de dados de satélites de órbita geoestacionária para o monitoramento da superfície da terra tornou-se mais relevante a partir de 2002, com o MSG (*Meteosat Second Generation*), série de satélites orbitais geoestacionários da ESA (*European Space Agency*) que, a partir do sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), produz a cada 15 minutos, com resolução espacial de 3 km (a nadir) e resolução radiométrica de 10 bits, imagens em 12 bandas espectrais (1 visível, 3 infravermelho, 7 termais e 1 pancromática). Dentre os satélites desta série, o Meteosat-10 está posicionado a 0° de longitude e latitude, com um campo de visada cobrindo toda a África, grande parte da Europa Ocidental, Oriente Médio e nordeste da América do Sul, incluindo o Brasil, com exceção do extremo oeste (estado do Acre e parte do Amazonas) (Schmetz et al., 2002).

A alta resolução temporal do Meteosat-10 pode representar uma vantagem relevante quando se considera que satélites de órbita polar enfrentam o desafio de gerar imagens livres de contaminação atmosférica e de nuvens, necessitando de várias observações ao longo de dias ou semanas para gerar uma imagem de composição (Fensholt et al., 2006; Solano et al. 2010; Fensholt et al., 2011). Por outro lado, satélites de órbita geoestacionária podem observar a superfície terrestre durante o dia com maior frequência e, através de janelas na cobertura de nuvens, obter imagens de composição de menor intervalo de dias (Fensholt et al., 2006; Ertürk et al., 2010). Da mesma forma, devido à alta resolução temporal do Meteosat-10, surgem oportunidades para abordar processos que ocorrem em cultivos, como a duração e intensidade da atividade fotossintética e compreensão da fenologia, que antes não podiam ser medidos (Fensholt et al., 2011; Rulinda et al., 2010). Ainda, mesmo com baixa resolução espacial, o Meteosat-10 demonstra-se bastante adequado ao estudo de sazonalidade ambiental e fenologia (Sobrino et al., 2013), cujas mudanças nas respostas da vegetação à sazonalidade podem vir a ser importantes indicadores de mudanças ambientais (Roy et al., 2014), apresentando alta correlação com satélites polares (Sarr e Lacaze, 2008).

Para esse monitoramento, os dados de sensoriamento remoto são utilizados para obtenção de indicadores ambientais que representam uma inferência de parâmetros biofísicos da vegetação, sendo utilizados como respostas frente a eventos climáticos e à

influência antrópica (Ginciene e Bitencourt, 2011). O Meteosat-10 permite a geração de diversos índices ambientais (Schmetz et al., 2002), incluindo o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*). O NDVI é obtido a partir da diferença normalizada entre as bandas de reflectância do infravermelho próximo e vermelho (Tucker, 1979), e representa um indicador eficiente para o monitoramento da vegetação devido à sua simplicidade e estreita relação com a produtividade (Tian et al., 2015), sendo considerado como o mais popular índice para estudar o vigor vegetativo e produção de culturas (Atzberger, 2013). O NDWI é obtido a partir da diferença normalizada entre as bandas de reflectância do infravermelho de ondas curtas e infravermelho próximo e representa um indicador de água ou umidade na superfície, relacionando a quantidade de água por unidade de área na vegetação (Gao, 1996), representando uma medida da umidade da superfície da terra combinando o solo e a vegetação expostos (Jovanovic et al., 2014).

Contudo, tais indicadores apresentam dependência de condições de iluminação, ângulo de visada e intensidade de vegetação, sendo os efeitos acentuados com o aumento do IFOV (*Instantaneous Field Of View*) que, para o Meteosat-10, é maior para o Brasil. Assim, e no que pesem o potencial do dado e possibilidades de aplicação, a utilização de imagens NDVI do Meteosat-10 requer que essas características sejam corretamente entendidas e modeladas, com o intuito de obter um indicador de melhor qualidade (Fensholt et al., 2006; Proud et al., 2010; Proud et al., 2014). Com efeito, reconhece-se que problemas existem, mas, além disso, que se entenda melhor esses problemas (Cracknell, 1998) e, com isso, se conheça o real potencial dos dados de satélites orbitais geoestacionários para o monitoramento ambiental da superfície da terra.

Para tanto, a proposta deste trabalho é investigar e conhecer o potencial de indicadores ambientais para monitoramento da superfície da terra gerados a partir de dados de satélite de órbita geoestacionária, especificamente o MSG.

1.2. Questões Investigativas

Diante do exposto, esta pesquisa buscou responder as seguintes questões:

1. Quais os desafios inerentes aos sistemas de órbita geoestacionária (ex. Meteosat-10) que precisam ser avaliados para obtenção de indicadores ambientais de vegetação para o Brasil?
2. Comparativamente aos sistemas de órbita polar e resolução espacial moderada, os sistemas geoestacionários permitem obter imagens de composição com alta cobertura (maior do que 95 %) em menor intervalo de dias?
3. Quais técnicas aplicadas aos dados geoestacionários permitem aumentar a correlação de indicadores ambientais de vegetação, comparativamente às imagens de órbita polar e resolução espacial moderada?
4. As imagens de indicadores biofísicos de vegetação provenientes de sistemas geoestacionários permitem compreender padrões sazonais em escalas regionais?

1.3. Hipóteses

Essas questões estão centradas nas seguintes hipóteses:

1. O satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 em alto ângulo de visada, como para o Brasil, apresenta alta porcentagem de erros de comissão na detecção de nuvens (Proud et al., 2014). Porém, apresenta maior resolução temporal de dados, comparativamente a satélites de órbita polar (Fensholt et al., 2011). Então, mesmo no período estação chuvosa a influência de nuvens é menor, permitindo obter imagens de composição com alta cobertura em menor intervalo de tempo.
2. O satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 apresenta alto ângulo de visada para o Brasil, o que acarreta em maior influência geométrica (Fensholt et al., 2006; Ermida et al., 2014) e atmosférica (Vermote et al., 1997) sobre a reflectância da superfície; então, o uso de técnicas de correção geométrica (Proud et al., 2014), atmosférica (Kotchenova e Vermote, 2007; Proud et al., 2010) e de fusão de bandas (Zhao et al., 2014) tende a aumentar a correlação entre indicadores biofísicos derivados de sistemas de órbita geoestacionária e polar.
3. Considerando o potencial de aplicação de indicadores biofísicos do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 (Fensholt et al., 2006; Fensholt et al., 2011; Sobrino et al., 2013), mesmo em condição de alto ângulo de visada para o Brasil, séries temporais de indicadores biofísicos de vegetação permitem compreender padrões sazonais e de cobertura do solo no âmbito de bacias hidrográficas.

1.4. Objetivo Geral

O objetivo geral da tese é identificar e avaliar características inerentes de dados de satélite de órbita geoestacionária, particularmente o Meteosat-10, para obtenção de

indicadores biofísicos de vegetação mais precisos para utilização em aplicações ambientais em escala regional.

1.5. Objetivos específicos

Com vistas a responder as perguntas de pesquisa, este estudo se apoiou nos seguintes objetivos específicos:

1. Identificar desafios inerentes do Meteosat-10 para obtenção de indicadores biofísicos de vegetação com maior qualidade.
2. Avaliar a resolução temporal e características da máscara de nuvens do sistema Meteosat-10, comparativamente a produtos MODIS, para obtenção de indicadores biofísicos de vegetação.
3. Avaliar a aplicação de técnicas de correção geométrica, atmosférica e de fusão de bandas com o intuito de aumentar a correlação de indicadores biofísicos de vegetação, especificamente do NDVI MSG em relação ao NDVI MODIS.
4. Avaliar a capacidade de séries temporais de indicadores biofísicos (p. ex. NDVI e NDWI) obtidos com dados Meteosat-10 para o estudo da sazonalidade e de mudanças de uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas do estado de Goiás e Distrito Federal.

1.6. Referências

- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 949-981, 2013.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.
- CRACKNELL, A. P. Review article Synergy in remote sensing what's in a pixel ? International **Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2025–2047, 1998.
- ERMIDA, S. L.; TRIGO, I. F.; DA CAMARA, C. C.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F. S.; HULLEY, G. Validation of remotely sensed surface temperature over an oak woodland landscape - The problem of viewing and illumination geometries. **Remote Sensing of Environment**, v. 148, p. 16-27, 2014.
- ERTÜRK, A.G.; ELLIOTT, S.; BARBOSA, H.; SAMAIN, O.; HEINEMANN, T. Pre-Operational NDVI Product Derived from MSG SEVIRI, 2010. Disponível em: <https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_CONF_P57_S1_05_ERTURK_P&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web>. Acesso: nov. 2017.

- FENSHOLT, R.; ANYAMBA, A.; HUBER, S., PROUD, S.R.; TUCKER, C.J. SMALL, J.; et al. Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary MSG SEVIRI data compared to Polar Operational Environmental Satellite data for land surface monitoring in Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 721-729, 2011.
- FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; STISEN, S.; TUCKER, C. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 212–229, 2006.
- GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257–266, 1996.
- JONES, H.G.; VAUGHAN, R. A. **Remote sensing of vegetation: principles, techniques and applications**. 1. ed. Oxford University Press: New York, 2010.
- JOVANOVIC, N.; GARCIA, C. L. BUGAN, R. D. H.; Teich, I.; RODRIGUEZ, C. M. G. 2014. Validation of Remotely-Sensed Evapotranspiration and NDWI Using Ground Measurements at Riverlands, South Africa. **Water SA**, v. 40, n. 2, p. 211–20.
- KOTCHENOVA S. Y.; VERMOTE E. F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data . Part II . Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. **Applied Optics**, v. 46, n. 20, 2007.
- KRAMER, H. J.; CRACKNELL, A. P. 2008. An overview of small satellites in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, n. 29, v. 15, n. 4285–4337.
- MELESSE, A. M.; WENG, Q., THENKABAIL, S. P.; SENAY, G. B. 2007. Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling. **Sensors**, v. 7, n. 12, p. 3209–3241.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNB, 2012.
- MURPH, D. EUMETSAT Geostationary Meteorological Satellite Programs. In: Pelton, J. N.; Madry, S.; Camacho-Lara, S. **Handbook of Satellite Applications**. Springer: New York, 2013. p. 1045-1074.
- PROUD, S. R.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SANDHOLT, I. A comparison of the effectiveness of 6S and SMAC in correcting for atmospheric interference of Meteosat Second Generation images. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D17209, p. 1 – 14, 2010.
- PROUD, S. R.; SCHAAF, C.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SHISANYA, C.; MUTERO, W.; et al. The Normalization of Surface Anisotropy Effects Present in

- SEVIRI Reflectances by Using the MODIS BRDF Method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 10, p. 6026 – 6039, 2014.
- ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C.E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; ET AL. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154–172, apr 2014.
- RULINDA, C.M.; BIJKER, W.; STEIN, A. Image mining for drought monitoring in eastern Africa using Meteosat SEVIRI data. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 12S, p. S63–S68, 2010.
- SALAMÍ, E.; BARRADO, C.; PASTOR, E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. **Remote Sensing**, v. 6, n. 11, p. 11051–11081, 2014.
- SARR, M. A.; LACAZE, B. Caractérisation de la dynamique de la végétation en Afrique de l'Ouest : comparaison des indices NDVI de MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR (exemple du Ferlo, Sénégal). In Texte issu d'une communication au colloque Météosat Seconde Génération : un nouvel outil de suiv., p. 1–10, 2008. Disponível em: <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260971>>. Acesso: out. 2017.
- SCHMETZ, J.; PILI, P.; TJEMKES, S.; JUST, D.; KERKMANN, J.; ROTA, S.; RATIER, A. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 7, p. 991–991, 2002.
- SELVA, D.; KREJCI, D. A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. **Acta Astronautica**, v. 74, p. 50–68, 2012.
- SOBRINO, J.A.; JULIEN, Y.; SORIA, G. Phenology estimation from meteosat second generation data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1653–1659, 2013.
- SOLANO, R.; DIDAN, K.; JACOBSON, A.; HUETE, A. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)**. 2010 Disponível em: <https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf>. Acesso: 10 mai. 2017.
- TIAN, E.; FENSHOLT, R.; VERBESSELT, J. GROGAN, K.; HORION, S.; WANG, Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 163, p. 326-340, 2015.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment** v. 150, p. 127-150, 1979.

- VERMOTE, E. F.; TANR, D.; DEUZ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.-j. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum , 6S : An Overview. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675–686, 1997.
- XIE, Y.; SHA, Z.; YU M. 2008. Remote Sensing Imagery in Vegetation Mapping: A Review. **Journal of Plant Ecology** v. 1. n. 1, p. 9–23.
- ZHAO, W.; Li, A.; BIAN, J.; JIN, H.; ZHANG, Z. A synergetic algorithm for midmorning land surface soil and vegetation temperatures estimation using MSGSEVIRI products and TERRA-MODIS products. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, 2213-2238, 2014.

Capítulo 2 : Revisão de aplicações com a série Meteosat Second Generation

Resumo

O sensoriamento remoto permite obter informações de condições superficial e atmosférica em nível global, principalmente por meio de imagens obtidas por sensores acoplados em séries satélites polares e geoestacionários. Os satélites de órbita geoestacionária (GEO) possuem como principais características a alta resolução temporal e a baixa resolução espacial, tornando-os particularmente úteis para a meteorologia e climatologia. Além disso, com o desenvolvimento das novas gerações GEOS, e mais canais espectrais, ampliou-se a gama de aplicações destes satélites. Particularmente, destaca-se a série MSG (Meteosat Second Generation), que por meio do sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), fornece dados em 12 canais espectrais com resolução espacial de 3 km a cada 15 minutos, tendo como campo de visada toda a África, grande parte da Europa Ocidental, Oriente Médio e nordeste da América do Sul, apresentando potencialidade para aplicação em novas áreas de pesquisa. Esse artigo tem como objetivo apresentar um estudo de revisão sobre aplicações ambientais de satélites geoestacionários, especificamente o MSG no mundo e no Brasil, buscando identificar como o satélite vem sendo utilizado pela comunidade acadêmica em pesquisas científicas, identificando características, aplicações em estimativa de variáveis meteorológicas, detecção e classificação bem como tendências futuras, a partir de pesquisas realizadas em todo o mundo. Por fim, o artigo apresenta uma discussão em relação à utilização de seus dados no Brasil, com boas perspectivas.

Palavras-chave: Meteosat, Geociências, Meteorologia.

2.1. Introdução

O sensoriamento remoto é a ciência de obter informações sobre objetos ou áreas à distância, normalmente de aeronaves ou satélites e permite obter informações sobre as condições da superfície e atmosfera, principalmente por satélites de órbita polar e geoestacionária que fornecem informações de parâmetros e indicadores ambientais em diferentes condições de resolução espacial (tamanho do menor recurso possível que pode ser detectado) e resolução temporal (tempo que leva para fornecer novamente informação de um determinado local). Os satélites polares estão sob uma órbita terrestre baixa (LEO, *Low Earth Orbiting*) a uma altitude aproximada de 800 km, fornecendo dados de âmbito global com alta resolução espacial e baixa resolução temporal. Por outro lado, os satélites geoestacionários estão sob uma órbita terrestre localizada a uma distância próxima de 36.000 km da Terra, em uma longitude específica no Equador, caracterizando-se pela alta resolução temporal e baixa resolução espacial (Liang et al., 2012).

A maioria das aplicações de sensoriamento remoto se baseia em dados de LEOs devido, principalmente, às características de alta resolução espacial, qualidade de dados

dos sensores (Roy et al., 2014) e à quantidade de bandas espectrais disponíveis (Friedl et al., 2010). Tais características permitem estimativas de diferentes parâmetros e indicadores ambientais, meteorológicos, oceanográficos, geológicos e ecológicos (Tomlinson et al., 2011; Amraoui et al., 2010). Essas informações são disponibilizadas por meio de produtos com resolução temporal diária à mensal utilizados para previsão e tomada de decisão, na maioria de estudos de sensoriamento remoto.

Já os satélites de órbita geoestacionária (GEOs, *Geostationary Earth Orbiting*) são vantajosos porque observam a superfície sempre da mesma perspectiva, fornecendo imagens do globo terrestre em breves intervalos de tempo. No entanto, uma das desvantagens é a baixa resolução espacial, devido a grande distância do satélite em relação à Terra. Devido a essas características, os GEOs são particularmente úteis para a meteorologia e climatologia (Schmetz et al., 2002), satisfazendo requisitos de meso e macro escalas (Orlanski, 1975). Além disso, as novas séries de GEOs apresentam resoluções espaciais e espectrais significativamente melhoradas, permitindo a utilização dos dados para o monitoramento e detecção de variáveis meteorológicas e da superfície terrestre que antes não eram possíveis (Vanhellemont et al., 2014; De Coning et al., 2011).

A série Meteosat, com a primeira geração lançada em 1977, tem como objetivo o fornecimento de dados por satélite e serviços relacionados em uma base contínua disponibilizada de forma gratuita para o mundo inteiro. A geração atual, em órbita desde 2002, é a MSG (*Meteosat Second Generation*), tendo como elemento principal o sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), que produz imagens em 12 canais espectrais com resolução espacial de 3 km a nadir, resolução temporal de 15 minutos e resolução radiométrica de 10 bits (Schmetz et al., 2002).

Diversas aplicações são desenvolvidas a partir de dados MSG, como o monitoramento de vegetação (Proud et al., 2014; Zhao et al., 2014), detecção de fogo (Sönmez et al., 2014, 2011), erupções vulcânicas (Guéhenneux et al., 2015), tempestades de areia (Tilev-Tanriover e Kahraman, 2015), chuvas e nuvens (Lazri et al., 2014b; Proud et al., 2015a), dentre outros. Além disso, a integração de dados de diferentes sistemas de monitoramento permite aprimorar e desenvolver novas aplicações, como a integração de dados de satélites com estações meteorológicas (Zhang et al., 2014; Avgoustoglou e Tzeferi, 2013), radares/lasers de superfície (Chevallier et al., 2013; Lazri et al., 2014b) e dados de outros satélites polares e geoestacionários (Sèze et al., 2015; Zhao et al., 2014; Stengel et al., 2014; Kox et al.,

2014). Mesmo com toda essa gama de aplicações o MSG pouco tem sido utilizado para o Brasil. Isso se deve a diversos fatores, como disponibilidade de outros satélites e produtos, alto ângulo de visada e falta de conhecimento sobre o MSG.

Esse artigo tem como objetivo apresentar um estudo das atuais aplicações ambientais de satélites geoestacionários, especificamente o MSG SEVIRI, no mundo e no Brasil, buscando identificar como o satélite vem sendo utilizado pela comunidade acadêmica em pesquisas científicas.

2.2. Materiais e Métodos

A metodologia baseou-se na pesquisa de artigos científicos nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, utilizando o termo "Meteosat Second Generation", publicados no período de 2010 a 2015. Os artigos foram classificados em relação à variável meteorológica foco de estudo, especificamente, temperatura da superfície do solo, temperatura da superfície do mar, radiação solar, vapor de água, precipitação, aerossol e poeira. Como também, foram classificados conforme aplicação de detecção e classificação, sendo nuvens, anomalias termais e vegetação. Porém, conforme as classificações foram realizadas, perceberam-se algumas especificidades dos estudos, relacionadas a produtos disponibilizados, sinergia entre dados de satélites, validação dos dados e utilização e perspectivas do MSG no Brasil.

2.3. Sistemas de Órbita Geoestacionária

Existem vários satélites de sensoriamento remoto distribuídos em órbitas geoestacionárias ao redor do mundo, desenvolvidos por diferentes agências de pesquisa que, unidos, fornecem uma visão global da Terra (Thies e Bendix, 2011): a série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) dos Estados Unidos (Xie et al., 2013); a série Meteosat da Agência Espacial Européia (ESA, *European Space Agency*) (Schmetz et al., 2002); a série Himawari da Agência Meteorológica Japonesa (JMA, *Japan Meteorological Agency*) (Kurino, 2012); a série FY-2 (*FengYun-2*) da Administração Meteorológica Chinesa (CMA, *China Meteorological Administration*) (Jin et al., 2010); a série ELECTRO da Agência Federal Espacial Russa (RFSA, *Russian Federal Space Agency*) (Hendrickx, 2004); a série INSAT (*Indian Satellite*) da Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO, *Indian Space Research Organization*) (Katti et al., 2006) e a série COMS (*Communication, Ocean and Meteorological Satellite*) da Coréia do Sul

(Faure et al., 2008). A Figura 2.1 apresenta a área de visada destes GEOs em relação à superfície da Terra.

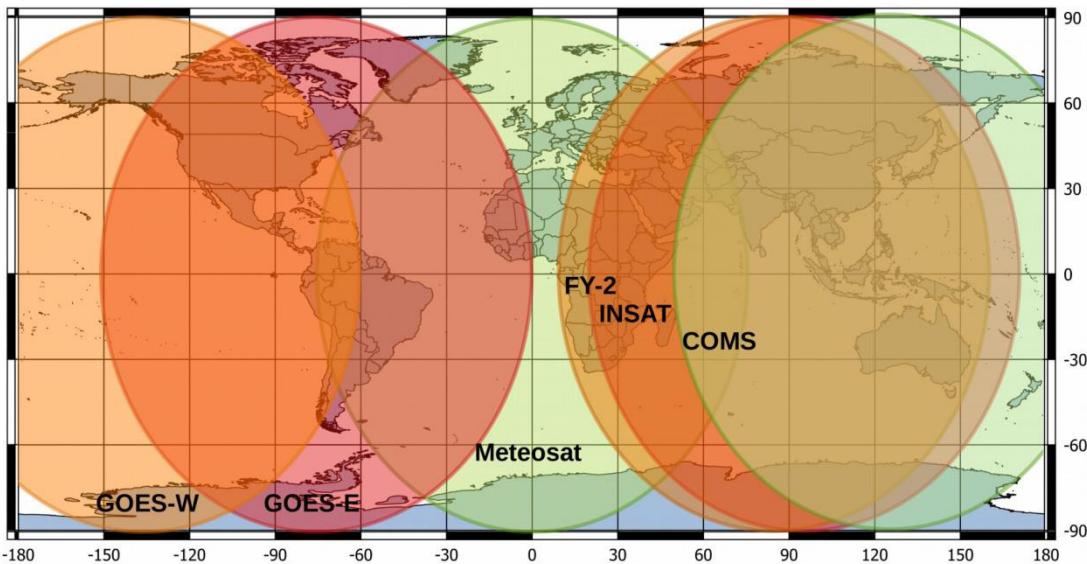


Figura 2.1. Área de visada dos satélites de plataforma geoestacionária ao redor da Terra. Respectivamente, da esquerda para a direita, tem-se o GOES-W (130° oeste), GOES-E (98° oeste), MSG (0° oeste), FY-2 (86° leste), INSAT (94° leste), COMS (128° leste).

Para o Brasil, o monitoramento ambiental utilizando GEOs é feito por três satélites: o GOES-E e GOES-W, da série GOES, localizados a 75° e 105° de longitude Oeste, respectivamente, e o Meteosat-10 da série MSG, localizado a 0° de longitude Oeste. A série GOES possui cinco bandas espectrais com resolução espacial de 1 km (a nadir) a 4 km, e resolução temporal de 25 minutos. O MSG possui 12 bandas espectrais com resolução de 3 km (a nadir), e resolução temporal de 15 minutos.

Comparado ao MSG, a série GOES possui como vantagens menor ângulo de visada, cobertura completa sobre o Brasil, e histórico de utilização por pesquisadores brasileiros. No entanto, o MSG possui mais canais do que o GOES, permitindo estudo de parâmetros com canais mais estreitos, melhorando a precisão das estimativas de parâmetros como precipitação, radiação solar, aerossol e temperatura da superfície.

2.4. A Série Meteosat Second Generation

A série Meteosat tem como objetivo o fornecimento de dados de sensoriamento remoto em uma base contínua para apoiar as demandas dos países membros da ESA, fornecendo dados de forma gratuita. A primeira série de satélites geoestacionários foi a MFG (Meteosat First Generation), composta de sete satélites (Meteosat-1 a Meteosat-7), sendo o Meteosat-1 o primeiro satélite geoestacionário meteorológico europeu, lançado em novembro de 1977. Atualmente, a série Meteosat, está em sua segunda geração, qual

seja a série MSG (*Meteosat Second Generation*), que utiliza estabilização por rotação e é composta por quatro satélites operacionais, particularmente o Meteosat-9 localiza-se a $9,5^{\circ}$ de longitude, com um campo de visada cobrindo a Europa e parte do norte da África e oceanos adjacentes, com uma resolução temporal de 5 minutos. O Meteosat-10 localiza-se a $0,0^{\circ}$ de longitude, com um campo de visada cobrindo toda a África, grande parte da Europa Ocidental, Oriente Médio e nordeste da América do Sul, com uma resolução temporal de 15 minutos. A Figura 2.2 apresenta a área de cobertura dos satélites Meteosat-9 e Meteosat-10. Observa-se que o ângulo de visada para o Oeste do Brasil é relativamente alto.

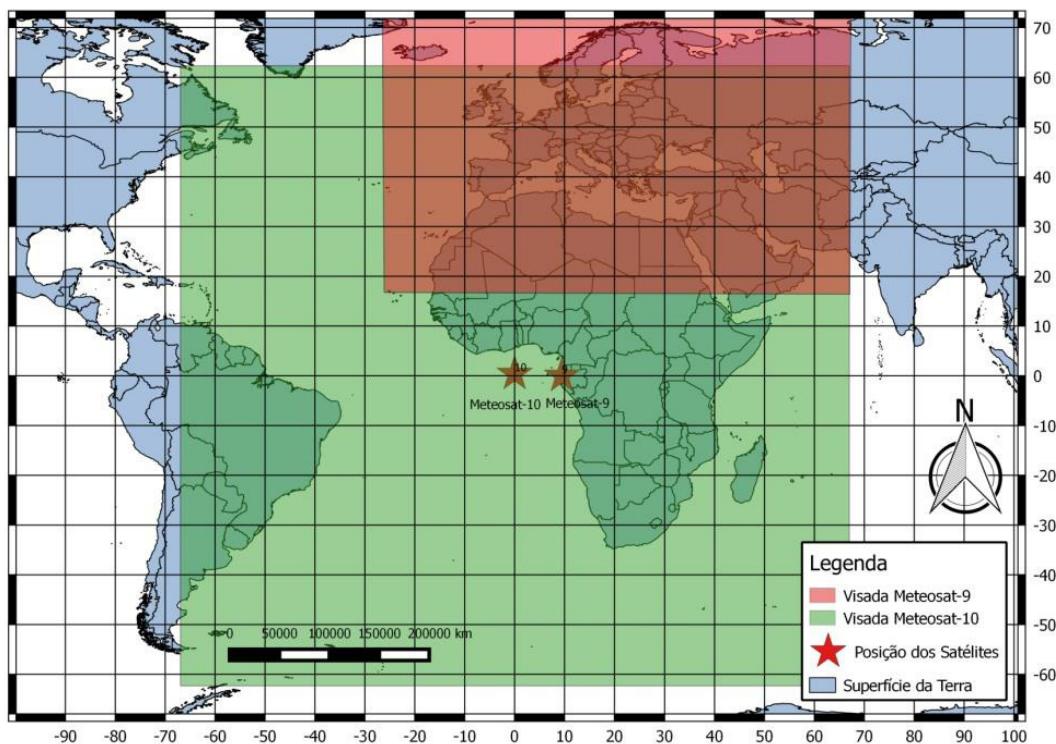


Figura 2.2. Mapa de representação da área de visada das imagens dos satélites Meteosat-9 (vermelho) e Meteosat-10 (verde). A estrela vermelha representa a posição de cada satélite sobre o Equador.

O SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), presente na série MSG, produz imagens em 12 bandas espectrais com resolução espacial de 3 km a nadir: três canais no visível, um no infravermelho próximo e oito no infravermelho médio e termal, tendo ainda o canal pancromático HRV (*High Resolution Visible*), na região do visível, com 1 km de resolução espacial a nadir (Schmetz et al., 2002). A Tabela 2.1 apresenta maiores informações sobre os canais do sensor SEVIRI (Schmetz et al., 2002).

Tabela 2.1. Informações dos canais do sensor SEVIRI, à bordo do MSG, com principais aplicações de cada canal. Fonte: Schmetz et al. (2002).

Canal	Nome	Característica espectral central e limiares (μm)	Principais aplicações de observação
1	VIS0.6	0.64 (0.56 - 0.71)	Superfície, nuvens e vento.
2	VIS0.8	0.81 (0.74 - 0.88)	Superfície, nuvens e vento.
3	NIR1.6	1.64 (1.50 - 1.78)	Superfície, fases da nuvem.
4	IR3.9	3.90 (3.48 - 4.36)	Superfície, nuvens e vento.
5	WV6.2	6.25 (5.35 - 7.15)	Vapor de água, nuvens de alto nível, instabilidade atmosférica.
6	WV7.3	7.35 (6.85 - 7.85)	Vapor de água, instabilidade atmosférica.
7	IR8.7	8.70 (8.30 - 9.10)	Superfície, nuvens, instabilidade atmosférica.
8	IR9.7	9.66 (9.38 - 9.94)	Ozônio.
9	IR10.8	10.80 (9.80 - 11.80)	Superfície, nuvens, vento, instabilidade atmosférica.
10	IR12.0	12.00 (11.00 - 13.00)	Superfície, nuvens, instabilidade atmosférica.
11	IR13.4	13.40 (12.40 - 14.40)	Altura de nuvens cirrus, instabilidade atmosférica.
12	HRV	não tem (0.40 - 1.10)	Superfície, nuvens.

O sistema EUMETCast é responsável pela retransmissão de forma gratuita dos dados do MSG para vários pontos do planeta via GEOs de telecomunicações comerciais em diferentes frequências. Os dados dos canais da série Meteosat podem ser facilmente captados utilizando uma infraestrutura simples e de baixo custo, composto de antena, módulo eletrônico de recepção e computador para armazenamento dos dados (Barbosa, 2014; Eumetcast, 2017).

Como exemplo de imagem obtida pelo Meteosat-10 a Figura 2.3 apresenta a Terra vista na composição RGB (canais 1, 2, 3). Observa-se a capacidade de distinção de padrões como superfície do solo (solo exposto, cobertura vegetal), superfície do mar e nuvens.

2.5. Variáveis meteorológicas

O monitoramento ambiental e climático da Terra se torna possível por meio de diferentes variáveis meteorológicas. Particularmente, o sensoriamento remoto tem papel crucial, pois fornece com acurácia 26 das 50 variáveis essenciais (Yang et al., 2014). A série Meteosat é utilizada para a estimativa de alguns parâmetros meteorológicos, sendo os principais a temperatura da superfície do solo e do mar, radiação solar, vapor de

água, aerossol, poeira e precipitação. A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos focos de aplicação dos estudos sobre esses parâmetros.

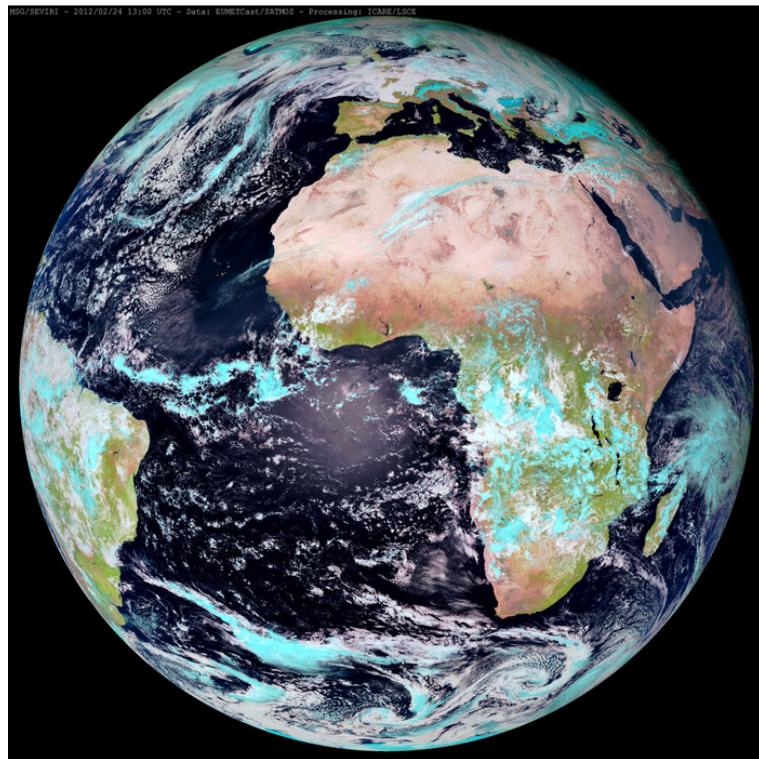


Figura 2.3. A Terra vista pelo Meteosat-10 na composição RGB (canais 1, 2, 3).

Tabela 2.2. Tabela de pesquisas relacionadas a Parâmetros Meteorológicos, a partir da série Meteosat, com informações sobre aplicações relacionadas.

Variável Meteorológica	Aplicação
Temperatura da Superfície do Solo	Utilização de preditores estáticos e dinâmicos (Keramitsoglou et al., 2013; Sismanidis et al., 2015), fusão de dados de diferentes satélites em escala temporal e espacial (Zhao et al., 2014; Holmes et al., 2015) e técnicas de regressão relacionando características de absorção da atmosfera (Jiang e Li, 2008; Fang et al., 2014).
Temperatura da Superfície do Mar	Utilizado para derivação de parâmetros ambientais como velocidade de correntes de maré (Chevallier et al., 2013) e ciclo diurno (Castro et al., 2014).
Radiação Solar	Cálculo de estimativas de radiância solar a partir de temperatura diária do ar (Bojanowski et al., 2013; Journée et al., 2012; Bertrand et al., 2015; Reinhardt et al., 2014; Morelli et al., 2015) e maior acurácia dessa estimativa considerando fatores relacionados (Geraldi et al., 2012; Reinhardt et al., 2014).
Vapor de Água	Avaliação de diferentes modelos de estimativa (Julien et al., 2015) e utilizando a técnica <i>Split- Window</i> (Labbi e Mokhnache, 2015).
Precipitação	Estimativa de precipitação por meio de uma relação entre as temperaturas do topo de nuvens medidas em um canal de infravermelho (Stephens e Kunnerow, 2007; Kidd e Levizzani, 2011), bem como novas técnicas relacionadas ao comportamento das nuvens (Kühnlein et al., 2014; Lazri et al., 2014a).
Aerossol	Explorando a dimensão temporal, considerando camadas estáticas e dinâmicas (Carrer et al., 2010; Geiger et al., 2008; Carrer et al., 2014) e utilizando esquemas de estimativa óptima (Govaerts et al., 2010) e redes neurais (Kox et al., 2014).
Poeira	Detecção e monitoramento da poeira (Tilev-Tanrıover e Kahraman, 2015; Laurent et al., 2010; Sodemann et al., 2006), equações que relacionam diferença de temperatura de brilho e limiares (Ashpole e Washington, 2012; Parajuli et al., 2013; Le Borgne et al., 2013) e modelos matemáticos regionais (Laurent et al., 2010; Tegen et al., 2013).

2.4.1. Temperatura da superfície do solo

A temperatura da superfície do solo (LST, *Land Surface Temperature*), baseada na emissividade dos alvos da superfície, representa um parâmetro chave em uma variedade de estudos científicos realizados com o MSG (Li et al., 2013; Liang et al., 2012; Ermida et al., 2014; Di et al. 2014; Zhang et al., 2014; Sismanidis et al., 2015). A qualidade da estimativa da LST influencia diretamente a acurácia de parâmetros dependentes, como evapotranspiração (Cruz-Blanco et al., 2014), vapor de água (Julien et al., 2015), cobertura vegetal (Ermida et al., 2014) e parâmetros do solo (Di et al., 2014). Essa estimativa, tradicionalmente, é feita utilizando os canais espectrais do infravermelho termal e micro-ondas (usado para obter a temperatura de algumas camadas do solo) (Zhao et al., 2014). No entanto, devido a influência de fatores atmosféricos (Li et al., 2013), novas técnicas têm sido empregadas na estimativa de temperatura da superfície em microescala (Orlanski, 1975) em áreas urbanas, como a utilização de preditores estáticos (geografia física) e dinâmicos (emissividade e índice de vegetação) (Keramitsoglou et al., 2013; Sismanidis et al., 2015), a fusão de dados de diferentes satélites com diferentes reoluções temporal e espacial (Zhao et al., 2014; Holmes et al., 2015) e utilizando a técnica *Split-Window*⁵ relacionando diferentes características de absorção da atmosfera em canais espectrais (Jiang e Li, 2008; Fang et al., 2014).

2.4.2. Temperatura da superfície do mar

A temperatura da superfície do mar (SST, *Sea Surface Temperature*) é um importante indicador do estado do sistema climático (Yang et al., 2014), uma vez que o mar detém a maior parte da água do ciclo hidrológico global (Karl et al., 2010), sendo utilizada como uma condição de contorno de superfície em modelos de previsão numérica do clima e para outras simulações de modelos atmosféricos (Reynolds et al., 2002). No MSG, este dado é utilizado para o estudo e derivação de outros parâmetros ambientais, como para a estimativa da frequência de variabilidade da velocidade de correntes de maré, utilizando o método de “máxima correlação cruzada”⁶ (Chevallier et al., 2013) e para a estimativa do ciclo diurno na superfície do oceano à partir da

⁵ A técnica Split-Window realiza operações entre bandas adjacentes do espectro infravermelho para estimativa de parâmetros ambientais ou atmosféricos.

⁶ O Método de correlação cruzada utiliza pares de imagens sequenciais sobre as quais são selecionadas janelas de moldura e busca que definem o vetor deslocamento da feição em função da máxima correlação encontrada entre as janelas estipuladas.

validação com dados de temperatura de boias Argo⁷, distribuídas no oceano Atlântico (Castro et al., 2014).

2.4.3. Radiação solar

A necessidade de fontes alternativas de energia estimula estudos e pesquisas sobre o uso de energia solar, que está diretamente relacionada à quantidade de radiação recebida em determinada área (Journée et al., 2012). Dessa forma, informações adequadas sobre os recursos solares são importantes para a concepção e dimensionamento de sistemas de geração de energia solar (Newton et al., 2014; Posselt et al., 2014; Bertrand et al., 2015). Igualmente importante é conhecer a distribuição espacial da radiação solar, pois funciona como um parâmetro chave na modelagem de parâmetros como a evapotranspiração, produtividade primária bruta e temperatura da superfície (Cristóbal e Anderson, 2013; Bojanowski et al., 2013). O sensoriamento remoto com dados MSG é utilizado para calcular estimativas de radiância solar diária em locais onde não existam medições da superfície, auxiliando na tomada de decisão para instalação de plantas para geração de energia solar (Bojanowski et al., 2013; Journée et al., 2012; Reinhardt et al., 2014; Bertrand et al., 2015; Morelli et al., 2015). Além disso, estudos são realizados na busca de maior acurácia dessa estimativa, considerando a influência de fatores impactantes, como os efeitos do aerossol e da cobertura de nuvens (Geraldi et al., 2012; Reinhardt et al., 2014).

2.4.4. Vapor de água atmosférico

O vapor de água atmosférico é um importante gás de efeito estufa (Schmidt et al., 2010; Thies e Bendix, 2011). Logo, detectar suas tendências locais e globalmente é importante para pesquisas climáticas. Alguns estudos realizados com dados MSG para estimativa de vapor de água propõem a avaliação de diferentes modelos de estimativa, como dado simulado, funções e coeficientes e radiossonda (Julien et al., 2015), bem como utilizando a técnica *Split-Window* (Labbi e Mokhnache, 2015).

2.4.5. Precipitação

Tradicionalmente, a resolução espectral de sensores ópticos disponíveis em plataformas GEO é baixa, o que tem permitido apenas definir a estimativa de

⁷ O projeto foi batizado em homenagem ao navio Argo da mitologia grega, o qual Jasão e os Argonautas usaram na sua busca pelo velo de ouro. O nome também foi escolhido para enfatizar a relação complementar com o satélite de altimetria Jason 1 (Jasão).

precipitação por meio de técnicas que dependam de uma relação entre as temperaturas do topo de nuvens medidas em um canal do infravermelho (Kummerow, 2007; Kidd e Levizzani, 2011). No entanto, novas técnicas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de compreender melhor as características das nuvens para a previsão e estimativa de precipitação, como a técnica aplicável às latitudes médias de forma contínua (dia, crepúsculo e noite), baseada em características das nuvens (Kühnlein et al., 2014) e em informações sobre as diferentes fases de duração e desenvolvimento de nuvens convectivas (do crescimento ao decaimento) (Lazri et al., 2014a).

2.4.6. Aerossol

A estimativa de aerossóis na baixa Troposfera está no centro de muitas aplicações, isso porque podem influenciar um vasto número de domínios, como o risco epidemiológico, segurança alimentar, qualidade do ar, saúde, gestão de risco, previsão de tempo, detecção de mudanças climáticas e ciclo hidrológico (Carrer et al., 2010; Yang et al., 2014). Por meio do MSG existem diversos estudos de estimativa de aerossol: explorando a dimensão temporal e considerando camadas estáticas (superfície) e dinâmicas (atmosfera) e um modelo de transferência radiativa simplificada (Geiger et al., 2008; Carrer et al., 2010; Carrer et al., 2014); utilizando esquemas de estimativa ótima, que consideram equilíbrio entre a informação que pode ser derivada à partir das observações e do conhecimento prévio do sistema (Govaerts et al., 2010); utilizando inteligência computacional alimentada com dados MSG, prevendo dados do CALIOP⁸ (*Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization*) (Kox et al., 2014).

2.4.7. Poeira

A poeira tem uma influência importante sobre o clima, por causa de seus efeitos sobre os processos meteorológicos, como transferência radiativa e formação de nuvens (Romano et al., 2013). O sensoriamento remoto, por meio da série MSG, permite a detecção e monitoramento da poeira com acurácia (Sodemann et al., 2006; Laurent et al., 2010; Tilev-Tanriover e Kahraman, 2015). Algumas técnicas são baseadas em equações que relacionam diferença de temperatura de brilho de alguns canais e valores

⁸ CALIOP (*Cloud-Aerosol Lidar com Orthogonal Polarização*) é um radar de laser sensível à polarização de dois comprimentos de onda (532 nm e 1064 nm), que fornece perfis verticais de alta resolução de aerossóis e nuvens, presente no satélite CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations*) lançado em abril de 2006 pela NASA, voando em órbita com vários outros satélites, na constelação internacional "A-Train".

de limiar (Ashpole e Washington, 2012; Parajuli et al., 2013; Le Borgne et al., 2013), enquanto outras utilizam modelos matemáticos regionais (Laurent et al., 2010; Tegen et al., 2013).

2.2. Detecção e classificação

Muitos estudos desenvolvidos com dados da série MSG estão relacionados à detecção e classificação, principalmente relacionados a eventos extremos, causados por nuvens e focos de incêndio. No entanto, há também aplicações relacionadas à detecção e classificação de processos da superfície, mais especificamente da cobertura vegetal. A Tabela 2.3 apresenta um resumo geral dos estudos em detecção e classificação de nuvens, anomalias termais e vegetação.

Tabela 2.3. Tabela de pesquisas relacionadas à Detecção e Classificação com dados da série MSG, especificando o foco de estudo.

Alvo de estudo	Técnica
Nuvens	Produto máscara de nuvens convencional (Derrien e Le Gléau, 2005; Amato et al., 2008; Reuter et al., 2009) e utilizando novas técnicas para maior acurácia (Derrien e Le Gléau, 2010; Hocking et al., 2011; Bley e Deneke, 2013; Taravat et al., 2015; Bennouna et al., 2010; Escrig et al., 2013). Detecção de nuvens de altas altitudes e suas características (Norquist et al., 2008; Proud , 2015a; Proud, 2015b; Bedka, 2011; Jurković et al., 2015; Žibert e Žibert, 2013; Penide et al., 2010; Merino et al., 2013; de Coning et al., 2011). Detecção e previsão de diversos tipos de eventos extremos (Kniffka et al., 2014; Lima e Machado, 2013; Henken, 2011; Hamann, 2014; Kox et al., 2014; Schomburg et al., 2015; Ricciardelli et al., 2014).
Anomalias termais	Detecção baseada na temperatura de brilho (Sönmez et al., 2011; Schmetz et al., 2002; Roberts e Wooster, 2008; Sönmez et al., 2014). Melhoria da acurácia baseada na sinergia com outras fontes de dados (Diagne et al., 2010; Sönmez et al., 2011, 2014; Amraoui et al., 2013).
Vegetação	Potencial dos dados MSG para a geração do índice ambiental NDVI (Fensholt et al., 2006; Rulinda et al., 2011; Sobrino et al., 2013; Roy et al., 2014; Fensholt et al., 2011), com correções geométrica (Proud et al., 2014; Ermida et al., 2014; Rasmussen et al., 2011) e atmosférica (Proud et al., 2010; Proud et al., 2010) e utilizado para estimativa de outros parâmetros ambientais (Ghilain et al., 2012; Nieto et al., 2011).

2.5.1. Nuvens

As nuvens representam um componente crítico do sistema climático, pois agem como moduladoras da energia que flui através do sistema Terra (Kniffka et al., 2014), interagindo com a energia radiativa solar e terrestre fluindo por meio de processos de reflexão, absorção e emissão (Taylor, 2012). Para o sensoriamento remoto, a presença de nuvem no pixel ocasiona alterações significativas na refletância, influenciando resultados de estimativa de temperatura da superfície do solo e do mar (Salvador et al.,

2013), irradiação solar (Geraldi et al., 2012), poeira (Romano et al., 2013), índice de vegetação (Proud et al., 2014) e detecção de incêndio (Amraoui et al., 2010).

Dessa forma, a estimativa de cobertura de nuvens representa operação preliminar para a discriminação de alvo e nuvem (Amato et al., 2008), informação essa que é gerada com dados MSG e disponibilizada através do produto máscara de nuvens (Derrien e Le Gléau, 2005; Amato et al., 2008; Reuter et al., 2009). No entanto, recentemente são investigadas outras técnicas para geração deste produto, como a inclusão da transição do dia-noite (Derrien e Le Gléau, 2010), uso de brilho de céu-claro simulado (Hocking et al., 2011), canal pancromático, de menor resolução espacial, para detecção de nuvens de menor escala espacial do que os canais multiespectrais, que não podem ser detectados pelos demais canais (Bley e Deneke, 2013), utilizando técnicas de inteligência computacional (Taravat et al., 2015) e análise multiespectral com sequência de testes de limiares dos canais (Bennouna et al., 2010; Escrig et al., 2013).

Já as nuvens de altas altitudes estão particularmente ligadas a correntes ascendentes fortes e chuvas pesadas, representando riscos graves para a sociedade e economia (Nisi et al., 2014). A utilização de sistemas de radar ou LIDAR (*Light Detection and Ranging*) para detecção dessas nuvens mostra-se, de certa forma, inviável, pois o sinal pode ser atenuado antes de alcançar o topo das nuvens (Hamann, 2014; Norquist et al., 2008). Por outro lado, devido as características intrínsecas dos GEOS, o sensoriamento remoto representa a principal fonte de dados para o estudo do comportamento dessas nuvens (Norquist et al., 2008; Proud, 2015a) em pesquisas: de nuvens polares mesosféricas através do método de Textura de Janela Infravermelha⁹ (Proud, 2015b; Bedka, 2011) e para detecção de eventos extremos com raios (Jurković et al., 2015); a estimativa de tempestades convectivas em sistemas que possuem anéis de frio no topo da nuvem (Žibert e Žibert, 2013) e em sistemas convectivos de mesoscala (monções) (Penide et al., 2010); detecção de tempestades de raios por meio de técnicas como geração de máscaras de nuvens e raios (Merino et al., 2013) e em um índice combinado de instabilidade baseado na frequência cumulativa de raios e na topografia local (de Coning et al., 2011).

Alguns dos estudos estão concentrados nas características e parâmetros de nuvens para a detecção e previsão de eventos extremos, como: tempestades e nevascas

⁹ O Método de textura infravermelha combina informações de temperatura de brilho de canais espectrais, previsão de temperatura da tropopausa (limite superior da camada atmosférica troposfera) e parâmetros de uma base de dados de tempestades anteriores.

através do caminho líquido da água, avaliando a variabilidade em regiões nebulosas e pela quantidade de nuvens (Kniffka et al., 2014); detecção de inundações, à partir da diferença das sombras das nuvens e de propriedades geométricas (Li et al., 2013); estimativa da estrutura vertical e classificação de nuvens utilizando o TRMM¹⁰ (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) (Lima e Machado, 2013) e um modelo de regressão logístico utilizando dados MSG e radar (Henken, 2011); estimativa de altura das nuvens a partir da comparação de resultados de diferentes algoritmos de detecção (Hamann, 2014), utilizando redes neurais artificiais (Kox et al., 2014) e modelagem de clima com dados de radar (Schomburg et al., 2015); e detecção e classificação de intensidade de chuva com a utilização de dados MSG, comparados aos dados do sonar AMSU-B (*Atmospheric Microwave Sounder Unit*) (Ricciardelli et al., 2014).

2.5.2. Anomalias termais

A detecção precoce de focos de incêncio é importante para reduzir o risco de possíveis catástrofes ambientais e sociais, sendo esta detecção possível de ser realizada com o MSG (Sönmez et al., 2011), baseado na temperatura de brilho de canais do sensor SEVIRI (Schmetz et al., 2002; Roberts e Wooster, 2008; Sönmez et al., 2014). Diferente do que ocorre com satélites polares, a anomalia termal pode ser detectada e monitorada a partir de várias imagens durante um único dia, devido à alta resolução temporal do MSG. Alguns estudos visam aprimorar a detecção com base em dados de alta resolução espacial sobre cobertura vegetal (Diagne et al., 2010) e dados de fontes diversas como Google Earth, EUMETCast e o produto FIR (*Active Fire Monitoring*) (Sönmez et al., 2011). Além disso, pesquisas são realizadas buscando aprimorar produtos de detecção de focos de incêndio (Amraoui et al., 2013) e avaliar a sua acurácia (Sönmez et al., 2014).

2.5.3. Vegetação

O sensoriamento remoto por meio dos GEOS tem se mostrado uma alternativa para o monitoramento da vegetação, isso porque a probabilidade de se observar a superfície do solo através de lacunas na cobertura de nuvens é consideravelmente maior, devido sua alta resolução temporal (Fensholt et al., 2006). O conhecimento da cobertura

¹⁰ TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) foi uma missão da NASA com parceria da JAXA (Japanese Aerospace eXploration Agency) para estudar as chuvas. O satélite operou de 1997 a abril de 2015.

vegetal a partir dos dados MSG permite o desenvolvimento de técnicas de estimativa de outros parâmetros ambientais, como a estimativa de evapotranspiração a partir de um modelo de superfície do solo, índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*) e Fração de Cobertura Vegetal (*Fractional Vegetation Cover*) (Ghilain et al., 2012) e a estimativa empírica da temperatura do ar (Nieto et al., 2011).

Vários estudos corroboram o potencial dos dados MSG para a geração do índice ambiental NDVI (*Normalize Difference Vegetation Index*) (Fensholt et al., 2006, 2011; Proud et al., 2014), sendo utilizado para estimar a variabilidade do conteúdo de clorofila e percentual de cobertura vegetal (Rulinda et al., 2011). O SEVIRI parece ser bastante adequado ao estudo de ecossistemas e da fenologia (Sobrino et al., 2013), pois possibilita a geração de composições de resolução temporal maior do que os satélites polares convencionais (Fensholt et al., 2006), detectando mudanças nas respostas da vegetação à sazonalidade que podem vir a ser importantes indícios de mudanças ambientais (Roy et al., 2014). Com a alta resolução temporal do MSG surgem oportunidades para abordar processos que antes não podiam ser medidos com satélites polares, como a duração e intensidade da atividade fotossintética e compreensão da fenologia (Rulinda et al., 2011; Fensholt et al., 2011). O NDVI mostra-se diretamente dependente dos ângulos de visada do satélite e de iluminação do Sol que se alteram durante o dia (Silveira et al., 2015), devido à diferença da reflexão anisotrópica dos canais visível e infravermelho, utilizados para calcular o NDVI (Tian et al., 2010), bem como das características físicas (volumétrica e geométrica) da superfície vegetal (Gao et al., 2002).

Particularmente, utiliza-se a técnica BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), considerando um modelo semi-empírico de núcleos dirigidos independentes, para estimativa dessas diferentes influências para o cálculo do NDVI (Gao et al., 2002). Estudos buscam a melhoria do algoritmo de cálculo de BRDF tanto para estimativa de cobertura vegetal (Proud et al., 2014), quanto para estudo da influência desta na estimativa de temperatura da superfície (Ermida et al., 2014; Rasmussen et al., 2011).

A correção de efeitos atmosféricos é importante devido à dinâmica de componentes atmosféricos (aerossóis, gases e nuvens) que alteram significativamente as estimativas do NDVI. Para isso, é utilizada a técnica SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Correction*), que demanda menos tempo e variáveis de processamento do que a técnica usual 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*)

que é mais robusta e complexa utilizada em satélites polares (Román et al., 2011; Qu et al., 2014). Estudos buscam aumentar a acurácia desta correção, através da avaliação do uso do SMAC com dados MSG (Proud et al., 2010) e com a inserção de parâmetros novos ao SMAC, comparado ao 6S, o tornam mais preciso (Proud et al., 2010).

2.2. Especificidades do MSG

2.6.1. Produtos

Para o desenvolvimento dos produtos e serviços com dados de satélites europeus a EUMETSAT organizou oito SAFs (*Satellite Application Facilities*) ou Instalações de Aplicação de Satélites, que são compostas por centros dedicados de excelência, especialistas sobre o assunto que fazem parte dos Estados-membro.

Os produtos da série MSG são disponibilizados pela EUMETSAT e fornecem informações relacionadas à radiação, refletância, atmosfera, precipitação, nuvens, clima, fogo, vegetação e erupções vulcânicas, podendo ser obtidos no Brasil por via online, FTP ou DVD. A Tabela 2.4 apresenta os produtos disponibilizados pelo escritório central da EUMETSAT em Darmstadt, Alemanha.

Tabela 2.4. Tabela de produtos disponibilizados pela EUMETSAT para o satélite Meteosat-10. Fonte: (EUMETSAT, 2016).

Tipos	Produtos
Atmosfera	Vetor de movimento atmosférico; Radiância de céu limpo; Conjunto de dados do clima; Imagem de análise de nuvens; Altura do topo da nuvem; Índice de precipitação de alta resolução; Parâmetros de nuvens; Ozônio total; Detecção de erupção vulcânica; Propriedades do aerossol sobre o mar; Índice de instabilidade global; Índice de precipitação de alta resolução; Umidade troposférica; Radiância de céu total e céu claro; Mapa de refletância de céu claro; Radiação; Irradiância diária e horária de ondas longas para baixo; Irradiância solar diária e horária de ondas curtas.
Superfície do Solo	Monitoramento de Fogo Ativo; Imagem HRI nível 1.5; NDVI diário; NDVI decadal.
Superfície do Mar	Temperatura horária da superfície do mar.

No entanto, percebe-se que, dos estudos avaliados, poucos fazem uso de produtos concebidos e disponibilizados pela EUMETCast. Destes, a maioria faz uso do produto máscara de nuvens para monitoramento de focos de incêndio (Sönmez et al., 2014), geração de base de dados temporal (Stengel et al., 2014) e espacial (Sèze et al., 2015) e modelo numérico de previsão meteorológica (Nisi et al., 2014; Schomburg et al., 2015). Alguns trabalhos fazem uso do produto de temperatura da superfície do solo utilizado para estimativa de conteúdo de água da superfície do solo (Zhang et al., 2014) e estimativa da inércia termal do solo (Di et al., 2014).

Por outro lado, visando solucionar problemas locais ou regionais, alguns trabalhos apresentam o desenvolvimento de novos produtos: aessorol de profundidade óptica (Newton et al., 2014; Carrer et al., 2014), temperatura de superfície do mar (Castro et al., 2014), temperatura do ar a dois metros (T2m) (Cruz-Blanco et al., 2014), poeira (Tilev-Tanrıover e Kahraman, 2015), fogo (Sönmez et al., 2014) e incêndio (Amraoui et al., 2013).

2.6.2. A sinergia entre satélites

No contexto de sensoriamento remoto, a sinergia está relacionada à utilização de duas ou mais fontes de dados para extrair informações que, de forma individual, não poderiam ser extraídas (Cracknell, 1998). Busca-se, além do preenchimento de lacunas espaciais e temporais nos dados, estimativa instantânea, aumento da acurácia, resolução temporal ou espacial e geração de séries temporais (Stephens et al., 2002; Karl et al., 2010; Diagne et al., 2010; Sorooshian et al., 2011; Vanhellemont et al., 2013).

É importante avaliar a geração de produtos mais confiáveis a partir da integração de dados de vários sensores, utilizando o melhor do conhecimento (medidas reais da superfície e atmosfera), reconhecendo vantagens e desvantagens de cada sensor (WMO, 2011). Neste contexto ocorre a sinergia de dados do MSG com alguns satélites geoestacionários (Freitas et al., 2013; Sèze et al., 2015), no entanto, destacam-se estudos relacionados à sinergia com o satélite polar MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para aumentar a resolução ou agregar parâmetros ambientais, como a derivação das temperaturas do solo e da vegetação (Zhao et al., 2014) e de parâmetros ambientais do oceano (Vanhellemont et al., 2013), a estimativa de incerteza da máscara de nuvens (Ricciardelli et al., 2010) e temperatura da superfície do solo em baixa escala (Sismanidis et al., 2015).

Por outro lado, a série GOES-R (*Geostationary Operational Environmental Satellite R-series*), que disponibiliza dados desde meados de 2017, representa a nova geração de satélites GOES e tem como principal instrumento o sensor ABI (*Advance Baseline Imager*) que possui 16 canais, com resolução de 2 km em 10 canais do espectro infravermelho, de 1 km em canais do espectro NIR e azul, 0,5 km no canal do espectro vermelho (Schmit et al., 2008). A série GOES atual possui apenas 5 canais espectrais com resolução temporal de 30 minutos e espacial de 4 km (Gurka e Schmit, 2004).

A sinergia entre as séries de satélites GOES-R e MSG mostra-se presente na similaridade das características dos canais espectrais dos sensores ABI e SEVIRI, o que permitirá a composição de mapas a partir da sinergia de imagens dos dois satélites, fornecendo dados com alta resolução temporal e cobertura quase global. Assim, alguns estudos têm utilizado dados do sensor SEVIRI como um representante chave (*proxy*) de dados ABI, como: estimativa de parâmetros meteorológicos e detecção de nuvens na ausência do sonar GOES-R (Schmit et al., 2008); temperatura da superfície (Xu et al., 2014); água parada e inundação (Nesdis, 2010); fração de cobertura vegetal (Tian et al., 2010); coluna total de ozônio (Jin et al., 2014); classificação de perfis atmosféricos utilizando modelo de transferência radiativa (Jin et al., 2011) e dados meteorológicos (Xie et al., 2013) e monitoramento, mapeamento e determinação de concentração de gelo em oceanos e lagos (Temimi et al., 2008).

Além disso, como a resolução temporal dos satélites é diferente, aumenta-se a possibilidade de ver a superfície do solo por meio de lacunas na cobertura de nuvens e, consequentemente, a qualidade dos produtos gerados. Ademais, o sensor ABI também está presente em outra série de satélites geoestacionários, a série Himawari, assim, mostra-se possível se obter imagens globais com características de bandas espectrais bastante similares com dados gerados pelos sensores dos satélites Himawari, GOES e METEOSAT.

2.6.3. A validação de dados

Por meio da utilização de dados de estações de superfície (meteorológica, radar, boias) é possível entender melhor as incertezas do MSG ao realizar a validação destes dados. Para isso, estações meteorológicas de superfície continentais e marítimas representam uma boa fonte para medidas de parâmetros meteorológicos (Slobodda et al., 2015); no entanto, apresentam alto custo e, consequentemente, são de distribuição esparsa (Journée et al., 2012). A maioria dos estudos faz uso desses dados para validar estimativas ou detecção de eventos meteorológicos, quais sejam: estimativa de características de nuvens a partir de dados de observatórios de nuvens (Slobodda et al., 2015) e radar de precipitação (Schomburg et al., 2015); previsão de eventos meteorológicos extremos como tempestades (Nisi et al., 2014), chuva de granizo (Merino et al., 2013) e precipitação (Bliznak et al., 2012) com base em dados de radar; detecção de eventos de baixa temperatura conhecidas como piscinas frias a partir de estações meteorológicas (Jiménez et al., 2015); e estudo do comportamento das marés,

baseada na temperatura da superfície do mar, dados de radar de alta frequência e simulação numérica (Chevallier et al., 2013). Há também estimativa de parâmetros meteorológicos, como, por exemplo, cálculo do conteúdo de água no solo (Merino et al., 2013; Zhang et al., 2014), temperatura da superfície do solo (Uspenskii et al., 2015) e radiação solar incidente (Cristóbal e Anderson, 2013; Bertrand et al., 2013; Newton et al., 2014), validada a partir de estações meteorológicas e parâmetros da superfície do mar, e a partir de boias fixas (Castro et al., 2014).

Além disso, a comunidade científica necessita do desenvolvimento de novas técnicas para a detecção de eventos extremos que possam levar a um avanço em sistemas de alerta e redução de desastres (Sorooshian et al., 2011), apontando que novos esforços de investigação devem se concentrar para melhorar a aplicação de dados de satélite em engenharia e tomada de decisão em requisitos relacionados a eventos meteorológicos extremos (Datla et al., 2010; Sorooshian et al., 2011), incluindo o desenvolvimento de algoritmos mais confiáveis (AghaKouchak et al., 2010). Para tanto, demonstra-se interessante avaliar técnicas que façam uso de dados provindos diretamente dos canais dos sensores, ao invés de fazer uso dos produtos disponibilizados pelas SAFs ou EUMETSAT, eliminando assim limitações ou incertezas presentes nas técnicas de geração destes produtos. Isso pode ser confirmado ao verificar que a grande maioria dos artigos avaliados (80 %) faz uso de dados diretamente dos canais espectrais, sendo que três quartos dos artigos (75%) estudam a detecção de eventos meteorológicos extremos, como nevasca, chuva, precipitação, geada e raios.

2.6.4. Utilização e perspectivas do MSG no Brasil

Devido à praticidade e baixo custo da instalação de uma base de recepção do satélite EUMETSAT, além da gratuidade de softwares de processamento, instituições do Brasil fazem uso dos dados Meteosat-10 para aplicações meteorológicas e monitoramento da superfície (dos Santos e Costa, 2013; Barbosa, 2014). A Tabela 2.5 apresenta detalhes destes estudos que tiveram como de áreas de estudo no Brasil, identificando a temática do estudo, canais utilizados, área e período de estudo.

Foram realizados estudos na costa da Região Nordeste, de características espectrais dos tipos das nuvens associadas com as tempestades severas, especificamente avaliando técnicas de fusão de dados para aumento da resolução espacial (Rocha e Barbosa, 2011), análise termodinâmica de eventos de tempestade (Carvalho et al., 2015)

e detecção de profundidade de sistemas convectivos (Barbosa et al., 2011, 2012b). Já na região Sudeste, por representar uma área com influência de vários fenômenos meteorológicos, foram feitos estudos relacionados à caracterização de nuvens de tempestade (da Cruz, 2009; Barbosa e Ertük, 2009a) e temperatura de brilho para estudo estimativa da umidade relativa do ar e a diferença entre as temperaturas do ar e do ponto de orvalho (Mariano e Cavalcanti, 2015). Assim, como apresentado no tópico 2.5.1, e seguindo a tendência de pesquisadores internacionais, grande parte dos estudos concentra-se em nuvens, devido à necessidade de detecção e classificação de eventos severos.

Tabela 2.5. Tabela de características das pesquisas com área de estudo no Brasil, desenvolvidas por pesquisadores de instituições do Brasil, no período de 2006 a 2015.

Temática	Canais utilizados	Área de estudo	Período
Geração de índice de vegetação NDVI por composição (Barbosa et al., 2006)	IR0.6, IR0.8	Global	10 dias (11 a 20/08/2006)
Geração de índice de vegetação NDVI diário (Barbosa e Ertük, 2009b)	IR0.6, IR0.8	Global	1 dia (20/04/2008)
Estimativa de índice de vegetação NDVI (Borges, 2010)	IR0.6, IR0.8	Região Sudeste	84 dias (02/08 a 23/10/2009)
Estudo da generalização cartográfica do índice de vegetação NDVI (Silveira et al., 2015)	IR0.6, IR0.8	Região Centro-Oeste	1 dia (23/08/2014)
Análise temporal da vegetação utilizando o NDVI (Correia e Silveira, 2015)	IR0.6, IR0.8	Região Centro-Oeste	365 dias (01/01 a 31/12/2013)
Estimativa da Temperatura da Superfície do Solo (Dantas e Ferreira, 2010)	VIS0.6, VIS0.8, IR9.7, IR10.8	Região Sudeste	18 dias (13 a 31/05/2009)
Caracterização de nuvens e potencial precipitação (Barbosa et al., 2011, 2012b)	IR3.9, WV6.2, WV7.3, IR10.8	Região Sul e Sudeste	1 dia (08/09/2009)
Fusão de bandas para monitoramento de temporais (Rocha e Barbosa, 2011)	VIS0.6, VIS0.87, NIR1.6, HRV	Região Nordeste	1 dia (04/06/2010)
Análise sinótica e Termodinâmica de temporais (Carvalho et al., 2015)	IR3.9, IR10.8	Região Nordeste	1 dia (06/04/2014)
Caracterização de nuvens de tempestade severa (Barbosa e Ertük, 2009a)	VIS0.6, NIR1.6, IR3.9, WV6.2, WV7.3, IR10.8	Região Sudeste	1 dia (24/10/2007)
Caracterização de nuvens de tempestade severa (da Cruz, 2009)	VIS0.6, NIR1.6, IR3.9, WV6.2, WV7.3, IR10.8, IR12.0	Região Sudeste	1 dia (24/10/2007) e 2 dias (04 e 05/02/2005)
Estimativa de umidade atmosférica (Mariano e Cavalcanti, 2015)	WV6.2, WV7.3	Brasil	2 dias (29 e 30/09/2012)

Foram identificadas poucas aplicações utilizando parâmetros meteorológicos, sendo estudos relacionados à estimativa da temperatura da superfície do solo (Dantas e Ferreira, 2010) e análise de correlação do NDVI com a temperatura da superfície do mar (Barbosa, 2012a). Algumas pesquisas relacionadas à avaliação meteorológica e estimativas de parâmetros ambientais fazem uso de outras fontes de dados com o objetivo de calibração dos resultados obtidos, especificamente estações meteorológicas

de superfície (Nieto et al., 2011), radiossondas de aeroportos (da Cruz, 2009) e acervo de dados composto por diferentes plataformas de observação (Mariano e Cavalcanti, 2015). Isso corrobora com as pesquisas internacionais que tendem a fazer uso da integração de tecnologias de sensores localizados na superfície para verificação e aumento da acurácia de dados de sensores geoestacionários.

Em estudos de superfície do solo, as pesquisas estão principalmente relacionadas à vegetação. Inicialmente, pela participação do centro de pesquisa da UFAL (Universidade Federal de Alagoas) na operacionalização e avaliação do NDVI, produzido a partir de dados de radiância do sensor SEVIRI, como indicador de mudanças no uso e cobertura do solo (Barbosa et al., 2006; Barbosa e Ertük, 2009b). Particularmente, esta instituição se destaca pela pesquisa, divulgação e disseminação dos produtos e serviços EUMETSAT (Barbosa, 2014). Posteriormente, realizaram-se estudos de generalização cartográfica do MSG comparado com dados de outros satélites, de menor resolução espacial e menor resolução temporal, como o CBERS-2B, MODIS e LANDSAT-8 (Borges, 2010; Silveira et al., 2015). O comportamento temporal do NDVI possibilita compreender características específicas de diferentes classes de uso do solo (Correia e Silveira, 2015).

Além desses estudos, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) desde 2006, faz uso da série MSG e destaca seu potencial para contribuição para as previsões de tempo e clima, sendo útil na geração de produtos indicadores de queimada, sondagem de perfil vertical da atmosfera, geração de dados de temperatura e umidade. Identificando vantagens reais em relação à série GOES (satélites 13 a 15) como sistema de recepção de dados simples e de baixo custo, maior disponibilidade para geração de imagens para o Brasil e maior resolução temporal (Alvalá et al., 2006).

Ademais, séries temporais do MSG são pouco estudadas no Brasil, sendo a maioria dos estudos relacionados à análise de apenas um dia. Particularmente, devido a alta resolução temporal de dados geoestacionários, obtém-se uma grande quantidade de imagens que, para processamento de séries temporais, muitas vezes precisa contar com o envolvimento de profissionais com conhecimento de informática. Aliás, essa tendência vem sendo atualmente reconhecida e aplicada em vários centros de pesquisa de sensoriamento remoto no Brasil.

2.2. Conclusão

A série MSG fornece dados que permitem o desenvolvimento de diversas variáveis ambientais com alta resolução temporal, bem como para detecção e classificação de nuvens, anomalias termais e vegetação. Diversos estudos são desenvolvidos baseados diretamente dos canais do sensor SEVIRI, pouco utilizando produtos disponibilizados.

Diferentemente da série atual GOES, as bandas espectrais do MSG permitem a obtenção de maior quantidade de parâmetros meteorológicos, bem como detecção e monitoramento de diversos processos superficiais, em particular, aqueles relacionados à dinâmica da cobertura e uso do solo.

Percebe-se que o MSG apresenta um potencial significativo para aplicações ambientais no Brasil, possuindo sinergia com a futura série de satélite GOES e disponibilidade de estações de superfície para calibração; no entanto, é preciso reconhecer que o alto ângulo de visada e dificuldade em operacionalizar processamento de dados de alta resolução temporal para séries temporais podem representar os principais elementos que limitam sua utilização.

2.3. Referências

- AGHAKOUCHAK, A.; BÁRDOSSY, A.; HABIB, E. Conditional simulation of remotely sensed rainfall data using a non-Gaussian v-transformed copula. **Advances in Water Resources**, v. 33, n. 6, p. 624-634, 2010.
- ALVALÁ, R. C. S.; MACHADO, L. A. T.; ROSSATO, L.; PEREIRA, S. P. Os satélites meteorológicos de nova geração e suas contribuições para as previsões de tempo e clima. In: 1º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, p. 770-780, Campo Grande. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnK2Y/Np34t/>>. Acesso: 20 mar. 2017.
- AMATO, U.; ANTONIADIS, A.; CUOMO, V.; CUTILLO, L.; FRANZESE, M.; MURINO, L.; SERIO, C. Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 750-766, 2008.
- AMRAOUI, M.; DACAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C. Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1038-1052, 2010.

- AMRAOUI, M.; LIBERATO, M. L. R.; CALADO, T. J.; DACAMARA, C. C.; PINTO, L.; TRIGO, R. M.; GOUVEIA, C. M. Fire activity over Mediterranean Europe based on information from Meteosat-8. **Forest Ecology and Management**, 294, 62-75, 2013.
- ASHPOLE, I.; WASHINGTON, R. An automated dust detection using SEVIRI: A multiyear climatology of summertime dustiness in the central and western Sahara. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D8, 2012.
- AVGOUSTOGLOU, E.; TZEFERI, T. The effect of a sub-grid statistical cloud-cover scheme applied to the COSMO local numerical weather prediction model over the wider geographical domain of Greece. **Atmospheric Research**, v. 152, n. 69-73, 2013.
- BARBOSA, H. A.; ACCIOLY FILHO, J. B. P.; MELCÍADES, W. L. B.; MELLLO, N. G. S.; SOUZA, J. M. D. Determinação do índice de Vegetação através de imagens Meteosat-8. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, p. 1-5, Aracaju. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, 2006. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/artigos_pdf/074_t.pdf>. Acesso: 29 mar. 2017.
- BARBOSA, H. A. 2012a. Investigating the impact of human-induced and climate. In: CLIMATE CHANGE, IMPACTS AND VULNERABILITIES EN BRAZIL: PREPARING THE BRAZIL NORTHEAST FOR THE FUTURE, p.1-3, Natal. **Anais...** Natal, 2012a. Disponível em: < <http://www.ccet.ufrn.br/cciv2012/>>. Acesso: Nov. 2017.
- BARBOSA, H. A.; ERTÜK, A. G. Utilização de imagens Meteosat de segunda geração para a detecção e monitoramento de sistemas convectivos severos atuantes no Brasil. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, p. 1641-1646, Natal. **Anais...** São Paulo: INPE, 2009a. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.29/doc/1641-1646.pdf>>. Acesso: 29 mar. 2017.
- BARBOSA, H. A.; ERTÜK, A. G. Índice diário de vegetação estimado com imagens multiespectrais do satélite Meteosat Segunda Geração. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, p. 5617-5624, Natal. **Anais...** São Paulo: INPE, 2009b. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.21.58/doc/5617-5624.pdf>>. Acesso: 29 mar. 2017.
- BARBOSA, H. A.; JUNIOR, I. W. S.; ERTÜK, A. G.; PRIETO, J. The cloud-top SEVIRI data for monitoring convective storms. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, p. 2180-2186, Curitiba. **Anais...** São Paulo: INPE, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0906.pdf>>. Acesso: 29 mar. 2017.

BARBOSA, H. A.; ERTÜRK, A. G.; DA SILVA, L. R. M. Using The Meteosat-9 images to the Detection of deep convective systems in Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 69-82, 2012b.

BARBOSA, H.A.; DA SILVA, L. R. M.; DOS SANTOS, A. M.; Pinto, NETO, C. P. S. Step Beyond Visualization: How to Ingest Meteosat Second Generation Satellite Data and Product into MCIDAS-V, ILWIS and TerraMA. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 1-15, 2014.

BEDKA, K. M. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe temperatures and their relationship to severe weather over Europe. **Atmospheric Research**, v. 99, n. June 2015, p. 175-189, 2011.

BENNOUNA, Y. S.; CURIER, L.; DE LEEUW, G.; PIAZZOLA, J.; ROEBELING, R.; DE VALK, P. An automated day-time cloud detection technique applied to MSG-SEVIRI data over Western Europe. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 23, p. 6073-6093, 2010.

BERTRAND, C.; VANDERVEKEN, G.; JOURNÉE, M. Evaluation of decomposition models of various complexity to estimate the direct solar irradiance over Belgium. **Renewable Energy**, v. 74, p. 618-626, 2015.

BLEY, S., DENEKE, H. A threshold-based cloud mask for the high-resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n. 10, p. 2713-2723, 2013.

BLIZNAK, V.; SOKOL, Z.; PESICE, P. The application of Rapid Scan data to the Convective Rainfall Rate algorithm from SAF NWC for the area of the Czech Republic. **Atmospheric Research**, v. 144, p. 82-94, 2012.

BOJANOWSKI, J. S.; DONATELLI, M.; SKIDMORE, A. K.; VRIELING, A. An auto-calibration procedure for empirical solar radiation models. **Environmental Modelling & Software**, v. 49, p. 118-128, 2013.

BORGES, L. A. Estimativa de NDVI no Estado de Minas Gerais Utilizando Imagens dos Satélites CBERS_2B/CCD e MSG/SEVIRI. 2010. 70 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

- CARRER, D.; CEAMANOS, X.; SIX, B.; ROUJEAN, J. AERUS-GEO: A newly available satellite-derived aerosol. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 21, p. 7731-7738, 2014.
- CARRER, D.; ROUJEAN, J. L.; HAUTECOEUR, O.; ELIAS, T. Daily estimates of aerosol optical thickness over land surface based on a directional and temporal analysis of SEVIRI MSG visible observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. 10, p. 1-24, 2010.
- CARVALHO, L.; DA SILVA, N. M.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. XIII Synoptic and Thermodynamic Analysis of Thunderstorms events in the Alagoas State the Northeast Brazil. In: XIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, Balneário Camboriú. **Anais...** IEEE, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7339310/>>. Acesso: Nov. 2017.
- CASTRO, S. L.; WICK, G. A.; BUCK, J. J. H. Comparison of diurnal warming estimates from unpumped Argo data and SEVIRI satellite observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 789-799, 2014.
- CHEVALLIER, C.; HERBETTE, S.; MARIÉ, L.; LE BORGNE, P.; MARSOUIN, A.; PÉRÉ, S.; et al. Observations of the Ushant front displacements with MSG/SEVIRI derived sea surface temperature data. **Remote Sensing of Environment**, v. 146, p. 3-10, 2014.
- CORREIA, L. H.; SILVEIRA, C. R. Índice de vegetação de satélite geoestacionário para análise temporal fenológica do Cerrado em Goiás. In X Simpósio Brasileiro de Agroinformática, Ponta Grossa. **Anais...** UEPG: Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <http://eventos.uepg.br/sbiagro/2015/anais/SBIAgro2015/pdf_resumos/20/20_leandro_henrique_correia_177.pdf>. Acesso: mar. 2017.
- CRACKNELL, A. P. 1998. Review article Synergy in remote sensing what's in a pixel? **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2025-2047.
- CRISTÓBAL, J.; ANDERSON, M. C. Validation of a Meteosat Second Generation solar radiation dataset over the northeastern Iberian Peninsula. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 163-175, 2013.
- CRUZ-BLANCO, M.; LORITE, I. I.; SANTOS, C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 131, n. 135-145, 2014.
- DA CRUZ, P. P. N. Utilização dos canais multiespectrais do sensor SEVIRI na detecção de sistemas convectivos severos no sudeste brasileiro - estudos de casos. 2009, 94 p.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas. Disponível em: <<http://repositorio.ufal.br/handle/riufal/887>>. Acesso: nov. 2017.

SILVEIRA, C. R.; MESQUISTA, V. V.; GUIMARÃES, L. F. Análise da generalização cartográfica em imagens índice de vegetação geradas a partir de dados Meteosat Second Generation. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, p. 683-690 João Pessoa. **Anais...** São Paulo: INPE, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0131.pdf>>. Acesso: mar. 2017.

DATLA, R.V.; KESSEL, R.; SMITH, A. W.; KACKER, R.N.; POLLOCK, D.B. Review Article: Uncertainty analysis of remote sensing optical sensor data: guiding principles to achieve metrological consistency. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 867-880, 2010.

DE CONING, E.; POOLMAN, E. South African Weather Service operational satellite based precipitation estimation technique: Applications and improvements. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 1131-1145, 2011.

DE CONING, E.; KOENIG, M.; OLIVIER, J. The combined instability index: A new very-short range convection forecasting technique for southern Africa. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 4, p. 421-439, 2011.

DERRIEN, M.; LE GLÉAU, H. MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 21, p. 4707-4732, 2011.

DERRIEN, M.; LE GLÉAU, H. Improvement of cloud detection near sunrise and sunset by temporal-differencing and region-growing techniques with real-time SEVIRI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 7, p. 1765-1780, 2010.

DI, A.; XUE, Y.; LI, C.; GUANG, J.; MEI, L.; PAN, P. Estimation of soil thermal inertia from geostationary Meteosat Second Generation (MSG) data. **Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 8, p. 763-772, 2014.

DIAGNE, M.; DRAME, M.; FERRÃO, C.; MARCHETTI, P. G.; PINTO, S.; RIVOLTA, G. Multisource data integration for fire risk management: The local test of a global approach. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 1, p. 93-97, 2010.

DOS SANTOS, A. S.; COSTA, O. A. Sistema de recepção de dados do Satélite Meteosat-9 na Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SERGIPE: Implementação e Aplicações. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, p. 7935-7941. Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo:

INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1098.pdf>>. Acesso: mar. 2017.

ERMIDA, S. L.; TRIGO, I. F.; DA CAMARA, C. C.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F. S.; HULLEY, G. Validation of remotely sensed surface temperature over an oak woodland landscape - The problem of viewing and illumination geometries. **Remote Sensing of Environment**, v. 148, p. 16-27, 2014.

ESCRIG, H.; BATLLES, F. J.; ALONSO, J.; BAENA, F.M.; BOSCH, J. L.; SALBIDEGOITIA, I. B.; BURGALETA, J. I. Cloud detection, classification and motion estimation using geostationary satellite imagery for cloud cover forecast. **Energy**, v. 55, p. 853-859, 2013.

EUMETCAST. EO Portal Directory, 2017. Meteosat Second Generation (MSG) Spacecraft Series. Disponível em: <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/meteosat-second-generation>>. Acesso: mar. 2017.

FANG, L.; YU, Y.; XU, H.; SUN, D. 2014. New retrieval algorithm for deriving land surface temperature from geostationary orbiting satellite observations. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 52, n. 2, p. 819-828.

FAURE, F.; COSTE, P.; KANG, G. The GOI instrument on COMS mission-The first geostationary ocean color imager. In International Conference on Space Optics (ICSO), 14-17. **Proceedings...** France, 2008. Disponível em: <<http://www.ioccg.org/sensors/GOCI-Faure.pdf>>. Acesso: mar. 2017.

FENSHOLT, R.; ANYAMBA, A.; HUBER, S., PROUD, S.R.; TUCKER, C.J. SMALL, J.; et al. Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary MSG SEVIRI data compared to Polar Operational Environmental Satellite data for land surface monitoring in Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 721-729, 2011.

FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; STISEN, S.; TUCKER, C. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, n. 2, p. 212-229, 2006.

DANTAS A. A. A.; FERREIRA, E.; Land Surface Temperatures From Meteosat-9 Satellite In Minas Gerais State. In INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM 2010, p. 2241-2243, Honolulu. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5649705/>>. Acesso: mar. 2017.

- Friedl, M.A.; Sulla-Menashe, D.; Tan, B.; Schneider, A.; Ramankutty, N.; Sibley, A.; Huang, X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 168-182, 2010.
- GAO, F.; JIN, Y.; LI, X.; SCHAAF, C. B. STRAHLER, A. H. Bidirectional NDVI and Atmospherically Resistant BRDF Inversion for Vegetation Canopy. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 40, n. 6, p. 1269-1278, 2002.
- GEIGER, B.; CARRER, D.; FRANCHISTÉGUY, L.; ROUJEAN, J. L.; MEUREY, C. 2008. Land surface albedo derived on a daily basis from meteosat second generation observations. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 46, n. 11, p. 3841-3856
- GERALDI, E.; ROMANO, F.; RICCIARDELLI, E. An advanced model for the estimation of the surface solar irradiance under all atmospheric conditions using MSG/SEVIRI data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 50, n. 8, p. 2934-2953, 2012.
- GHILAIN, N.; Arboleda, A.; Sepulcre-CantO, G.; Batelaan, O.; Ardó, J.; GELLENSMEULENBERGHS, F. Improving evapotranspiration in a land surface model using biophysical variables derived from MSG/SEVIRI satellite. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 8, p. 2567-2583, 2012.
- GOVAERTS, Y. M.; WAGNER, S., LATTANZIO, A.; WATTS, P. 2010. Joint retrieval of surface reflectance and aerosol optical depth from MSG/SEVIRI observations with an optimal estimation approach: 1. Theory. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D2.
- GUÉHENNEUX, Y.; GOUHIER, M.; LABAZUY, P. Improved space borne detection of volcanic ash for real-time monitoring using 3-Band method. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 293, p. 25-45, 2015.
- GURKA, J. J.; SCHMIT, T. J. 2004. Baseline instruments planned for the GOES-R series. In Proceedings of SPIE, v. 5549, p. 96, Colorado. **Proceedings...** Colorado: SPIE, 2004. Disponível em: < <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5549.toc>>. Acesso: Nov. 2017.
- HAMANN, U.; WALTHER, A.; BAUM, B.; BENNARTZ, R.; BUGLIARO, L. DERRIEN, M.; et al. Remote sensing of cloud top pressure/height from SEVIRI: analysis of ten current retrieval algorithms. **Atmospheric Measurement Techniques Discussion**, v. 7, p. 2839-2867, 2014.

- HENDRICKX, B. A History of Soviet / Russian Meteorological Satellites. **Space Chronicle**, v. 57, n. 1, p. 56-102, 2004.
- HENKEN, C.C.; SCHMEITS, M.J.; DENEKE, H.; ROEBELING, R. A. Using MSG-SEVIRI cloud physical properties and weather radar observations for the detection of Cb/TCu clouds. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, p. 1587-1600, 2011.
- HOCKING, J.; FRANCIS, P. N.; SAUNDERS, R. Cloud detection in Meteosat Second Generation imagery at the Met Office. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 307-323, 2011.
- HOLMES, T.; CROW, W.; HAIN, C.; ANDERSON, M.; KUSTAS, W. Diurnal temperature cycle as observed by thermal infrared and microwave radiometers. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 110-125, 2015.
- JIANG, G.; LI, Z. Split window algorithm for land surface temperature estimation from MSG1 SEVIRI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 20, p. 6067-6074, 2008.
- JIMÉNEZ, M.; RUIZ, A.; CUXART, J. 2015. Estimation of cold pool areas and chilling hours through satellite-derived surface temperatures. **Agricultural and Forest Meteorology** 207, 58-68.
- JIN, X.; Li, J.; SCHMIT, T. J.; GOLDBERG, M. D. Evaluation of radiative transfer models in atmospheric profiling with broadband infrared radiance measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 3, p. 863-874, 2011.
- JIN, X.; Li, J.; SCHMIDT, C. C.; SCHMIT, T. J.; Li, J. Retrieval of Total Column Ozone From Imagers Onboard Geostationary Satellites. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 46, n. 2, p. 479-488, 2014.
- JIN, Y.Q.; LU, N.; LIN, M. 2010. Advancement of chinese meteorological Feng-Yun (FY) and oceanic Hai-Yang (HY) satellite remote sensing. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 5, p. 844-861.
- JOURNÉE, M.; STÖCKLI, R.; BERTRAND, C. 2012. Sensitivity to spatio-temporal resolution of satellite-derived daily surface solar irradiation. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 4, p. 315-324.
- JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; MATTAR, C.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. 2015. Near-Real-Time Estimation of Water Vapor Column From MSG-SEVIRI Thermal Infrared Bands: Implications for Land Surface Temperature Retrieval. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, n. 8, p. 4231-4237.

- KARL, T.R.; DIAMOND, H.J.; BOJINSKI, S.; BUTLER, J.H.; DOLMAN, H. HAEBERLI, W; et al. Observation needs for climate information, prediction and application: Capabilities of existing and future observing systems. **Procedia Environmental Sciences**, v. 1, p. 192-205, 2010.
- KATTI, V. R.; PRATAP, V. R.; DAVE, R. K.; MANKAD, K. N. 2006. INSAT-3D An Advanced Meteorologica Mission Over Indian Ocean. In: SPIE PROCEEDINGS, v. 6407, p. 640709-1 to 12, India. **Proceedings...** India: SPIE, 2006. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6407.toc>> . Acesso: Nov. 2017.
- KERAMITSOGLOU, I.; KIRANOUDIS, C. T.; WENG, Q. Downscaling geostationary land surface temperature imagery for urban analysis. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 5, p. 1253-1257, 2013.
- KIDD, C.; LEVIZZANI, V. Status of satellite precipitation retrievals. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1109-1116, 2011.
- KNIFFKA, A.; STENGEL, M.; LOCKHOFF, M.; BENNARTZ, R.; HOLLMANN, R. Characteristics of cloud liquid water path from SEVIRI onboard the meteosat second generation 2 satellite for several cloud types. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 7, n. 4, p. 887-905, 2014.
- KOX, S., BUGLIARO, L.; OSTLER, A. Retrieval of cirrus cloud optical thickness and top altitude from geostationary remote sensing. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 7, n. 10, p. 3233-3246, 2014.
- KÜHNLEIN, M.; APPELHANS, T.; THIES, B.; NAUB, T. Precipitation estimates from MSG SEVIRI daytime, night-time and twilight data with random forests. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 53, p. 2457-2480, 2014.
- KURINO, T. 2012. **Future Plan and Recent Activities for the Japanese Follow-on Geostationary Meteorological Satellite Himawari-8/9.** Disponível em: <www.eumetsat.int>. Acesso: mar. 2017.
- LABBI, A.; MOKHNACHE, A. Estimating of total atmospheric water vapor content from MSG1-SEVIRI observations. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, p. 8903-8923, 2015.
- LAURENT, B.; TEGEN, I.; HEINOLD, B.; SCHEPANSKI, K.; WEINZIERL, B.; ESSELBORN, M. A model study of Saharan dust emissions and distributions during the SAMUM-1 campaign. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D21, 2010.

- LAZRI, M.; AMEUR, S.; BRUCKER, J.M.; OUALLOUCHE, F. Convective rainfall estimation from MSG/SEVIRI data based on different development phase duration of convective systems (growth phase and decay phase). **Atmospheric Research**, v. 147-148, p. 38-50, 2014a.
- LAZRI, M.; AMEUR, S.; MOHIA, Y. Instantaneous rainfall estimation using neural network from multispectral observations of SEVIRI radiometer and its application in estimation of daily and monthly rainfall. **Advances in Space Research**, v. 53, n. 1, p. 138-155, 2014b.
- LE BORGNE, P.; PÉRÉ, S.; ROQUET, H. Night time detection of Saharan dust using infrared window channels: Application to NPP/VIIRS. **Remote Sensing of Environment**, v. 137, p. 264-273, 2013.
- LI, S.; SUN, D.; YU, Y. Automatic cloud-shadow removal from flood/standing water maps using MSG/SEVIRI imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 15, p. 5487-5502, 2013.
- LI, Z.; ZHAO, X.; KAHN, R.; MISHCHENKO, M.; REMER, L.; LEE, K.-H.; et al. Uncertainties in satellite remote sensing of aerosols and impact on monitoring its long-term trend: A review and perspective. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 7, p. 2755-2770, 2009.
- LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications. 1 edition. Academic Press. San Diego, 2012.
- LIMA, W.F.; MACHADO, L. 2013. Cloud reflectivity profile classification using MSG/SEVIRI infrared multichannel and TRMM data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 12, p. 4384-4405.
- LUCHT, W.; SCHAAF, C.; A. H. STRAHLER. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 38, n. 2, p. 977-998, 2000.
- MARIANO, E. B.; CAVALCANTI, E. P. Correlação entre Medições dos Canais 5 e 6 do Satélite MSG e o Teor de Umidade do Ar Obtido pelo Modelo BRAMS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2015.
- MERINO, A.; LÓPEZ, L.; SÁNCHEZ, J.L.; GARCÍA-ORTEGA, E.; CATTANI, E.; LEVIZZANI, V. Daytime identification of summer hailstorm cells from MSG data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, p. 1017-1033, 2014.

JURKOVIĆ, P. M.; MAHOVIĆ, N.S.; POČAKAL, D. Lightning, overshooting top and hail characteristics for strong convective storms in Central Europe. **Atmospheric Research**, v. 161-162, p. 153-168, 2015

MORELLI, M.; MASINI, A.; RUFFINI, F.; POTENZA, M. A. C. Web tools concerning performance analysis and planning support for solar energy plants starting from remotely sensed optical images. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 52, n. 18-23, 2015.

NESDIS, NOAA. 2010. GOES-R R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Surface Albedo. Technical Report. Disponível em: <http://www.goes-r.gov/products/ATBDs/option2/Land_Albedo_v1.0_no_color.pdf>. Acesso: 30 mar. 2017.

NEWTON, B.; COWIE, S., RIJKS, D.; BANKS, J.; BRINDLEY, H.; MARSHAM, J. H. Solar Cooking in the Sahel. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. September, p. 1325-1328, 2014.

NIETO, H.; SANDHOLT, I.; AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; STISEN, S. Air temperature estimation with MSG-SEVIRI data: Calibration and validation of the TVX algorithm for the Iberian Peninsula. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 107-116, 2011.

NISI, L.; AMBROSETTI, P.; CLEMENTI, L. Nowcasting severe convection in the Alpine region: The COALITION approach. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 140, n. 682, p. 1684-1699, 2014.

NORQUIST, D. C.; DESROCHERS, P. R.; MCNICHOLL, P. J.; ROADCAP, J. R. 2008. A characterization of cirrus cloud properties that affect laser propagation. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 5, p. 1322-1336.

ORLANSKI, I. A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. **American Meteorological Society**, v. 56, n. 5, p. 527-530, 2014.

PARAJULI, S.P.; GHERBOUDJ, I.; GHEDIRA, H. The effect of soil moisture and wind speed on aerosol optical thickness retrieval in a desert environment using SEVIRI thermal channels. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 14, p. 5054-5071, 2013.

PENIDE, G.; GIRAUD, V.; BOUNIOL, D.; DUBUISSON, P.; DUROURE, C.; PROTAT, A.; et al. Numerical simulation of the 7 to 9 september 2006 AMMA mesoscale convective system: Evaluation of the dynamics and cloud microphysics using

synthetic observations. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 136, n. 1, p. 304-322, 2014.

POSSELT, R.; MUELLER, R.; TRENTMANN, J.; STOCKLI, R.; LINIGER, M. A. A surface radiation climatology across two Meteosat satellite generations. **Remote Sensing of Environment**, v. 142, p. 103-110, 2014.

PROUD, S. R.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SANDHOLT, I. A comparison of the effectiveness of 6S and SMAC in correcting for atmospheric interference of Meteosat Second Generation images. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D17209, p. 1-14, 2010.

PROUD, S. R. Observation of Polar Mesospheric Clouds by Geostationary Satellite Sensors. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 6, 1332-1336, 2015a.

PROUD, S. R. Analysis of overshooting top detections by Meteosat Second Generation: a 5-year dataset. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 688, p. 909-915, 2015b.

PROUD, S.R.; RASMUSSEN, M. O.; FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; SHISANYA, C. MBOW, C.; et al. 2010. Improving the SMAC atmospheric correction code by analysis of Meteosat Second Generation NDVI and surface reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 8, p. 1687-1698.

PROUD, S. R.; SCHAAF, C.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SHISANYA, C. SHISANYA, C. The Normalization of Surface Anisotropy Effects Present in SEVIRI Reflectances by Using the MODIS BRDF Method. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 52, n. 10, p. 6026-6039, 2014.

QU, Y.; LIU, Q.; LIANG, S., WANG, L.; LIU, N.; LIU, S. Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from modis data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 52, n. 2, p. 907-919, 2014.

RASMUSSEN, M.O.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F.; SANDHOLT, I. 2011. Directional Effects on Land Surface Temperature Estimation From Meteosat Second Generation for Savanna Landscapes. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 49, n. 11, p. 4458-4468.

REINHARDT, B.; BURAS, R.; BUGLIARO, L.; WILBERT, S., MAYER, B. Determination of circumsolar radiation from Meteosat Second Generation. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 7, n. 3, p. 823-838, 2014.

- REUTER, M.; THOMAS, W.; ALBERT, P.; LOCKHOFF, M.; WEBER, R.; KARLSSON, K.G.; et al. The CM-SAF and FUB cloud detection schemes for SEVIRI: Validation with synoptic data and initial comparison with MODIS and CALIPSO. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 2, p. 301-316, 2009.
- REYNOLDS, R.W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T.M.; STOKES, D.C.; WANG, W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, n. 13, p. 1609-1625, 2002.
- RICCIARDELLI, E.; CIMINI, D.; DI PAOLA, F.; ROMANO, F.; VIGGIANO, M. A statistical approach for rain intensity differentiation using Meteosat Second Generation-Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18c, n. 7, p. 2559-2576, 2014.
- RICCIARDELLI, E.; ROMANO, F.; CUOMO, V. A technique for classifying uncertain MOD35/MYD35 pixels through Meteosat Second Generation-Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager observations. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 48, n. 4, p. 2137-2149, 2010.
- ROBERTS, G. J.; WOOSTER, M. J. 2008. Fire Detection and Fire Characterization Over Africa Using Meteosat SEVIRI. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 46, n. 4, p. 1200-1218.
- ROCHA, D. R. S.; BARBOSA, H. A. Fusão de canais do satélite Meteosat-9 para monitoramento de tempestades severas, In XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 4752-4759, Curitiba. **Anais...** São Paulo: INPE, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1248.pdf>>. Acesso: 30 mar. 2017.
- ROMÁN, M. O.; GATEBE, C. K.; SCHAAF, C. B.; POUDYAL, R.; WANG, Z.; KING, M. D. Variability in surface BRDF at different spatial scales (30m-500m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2184-2203, 2011.
- ROMANO, F.; RICCIARDELLI, E.; CIMINI, D.; DI PAOLA, F. D.; VIGGIANO, M. 2013. Dust detection and optical depth retrieval using MSG-SEVIRI data. **Atmosphere**, v. 4, n. 1, p. 35-47.
- ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C.E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; ET AL. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, n. 154-172, 2014.

- RULINDA, C. M.; BIJKER, W.; STEIN, A. The chlorophyll variability in Meteosat derived NDVI in a context of drought monitoring. **Procedia Environmental Sciences**, v. 3, p. 32-37, 2011.
- SALVADOR, P.; CALLE, A.; SANZ, J.; RODRÍGUEZ, J.; CASANOVA, J. L. An automatic self-learning cloud-filtering algorithm for Meteosat Second Generation Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager. **Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 2, p. 180-189, 2013.
- SCHMETZ, J.; PILI, P.; TJEMKES, S., JUST, D.; KERKMANN, J.; ROTA, S.; et al. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 7, p. 991-991, 2002.
- SCHMIDT, G. A.; RUEDY, R. A.; MILLER, R.L.; LACIS, A. A. Attribution of the present-day total greenhouse effect. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D20, p. 1-6, 2010.
- SCHMIT, T.J.; LI, J.; LI, J.; FELTZ, W. F.; GURKA, J.J.; GOLDBERG, M.D.; et al. The GOES-R advanced baseline imager and the continuation of current sounder products. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 10, p. 2696-2711, 2008.
- SCHOMBURG, A.; SCHRAFF, C.; POTTHAST, R. A concept for the assimilation of satellite cloud information in an Ensemble Kalman Filter: single-observation experiments. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 688, p. 893-908, 2015.
- SÈZE, G.; PELOU, J.; DERRIEN, M.; LE GLÉAU, H.; SIX, B. 2015. Evaluation against CALIPSO lidar observations of the multi-geostationary cloud cover and type dataset assembled in the framework of the Megha-Tropiques mission. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 688, p. 774-797.
- SISMANIDIS, P.; KERAMITSOGLOU, I.; KIRANOUDIS, C. T. Evaluating the Operational Retrieval and Downscaling of Urban Land Surface Temperatures. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, v. 6, p. 1312-1316, 2015.
- SLOBODDA, J.; HÜNERBEIN, A.; LINDSTROT, R.; PREUSKER, R.; EBELL, K.; FISCHER, J. Multichannel analysis of correlation length of SEVIRI images around groundbased cloud observatories to determine their representativeness. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, n. 2, p. 567-578, 2015.

- SOBRINO, J. A.; JULIEN, Y.; SORIA, G. Phenology estimation from meteosat second generation data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1653-1659, 2013.
- SODEMANN, H.; PALMER, A. S.; SCHWIERZ, C.; SCHWIJKOWSKI, M.; WERNLI, H. The transport history of two Saharan dust events archived in an Alpine ice core. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 7497-7545, 2006.
- SÖNMEZ, I.; ERDI, E.; TEKELİ, A.E.; DEMİR, F.; ARSLAN, M. Foogle: fire monitoring tool for EUMETSAT's active fire product over Turkey using Google Earth. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2011.
- SÖNMEZ, I.; TEKELİ, A.E.; ERDI, E.; DEMİR, F.; ARSLAN, M. Validation of the Meteosat Second Generation (MSG) fire monitoring product using ground observations over Turkey., v. 7, n. 8, p. 3389-3398, 2014.
- SOROOSHIAN, S. AGHAKOUCHAK, A.; ARKIN, P.; EYLANDER, J.; FOUFOULA-GEORGIOU, E.; HARMON, R.; et al. Advanced Concepts on Remote Sensing of Precipitation at Multiple Scales. **American Meteorological Society** v. October (2), p. 1353-1357, 2011.
- STENGEL, M. S.; KNIFFKA, A. K.; MEIRINK, J. F. M.; LOCKHOFF, M. L.; TAN, J. T.; HOLLMANN, R. H. 2014. CLAAS: The CM SAF cloud property data set using SEVIRI. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 8, p. 4297-4311.
- STEPHENS, G. L.; KUMMEROW, C. D. The Remote Sensing of Clouds and Precipitation from Space: A Review. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, n. 11, p. 3742-3765, 2007.
- STEPHENS, G.L. VANE, D.; BOAIN, R.; MACE, G.G.; SASSEN, K.; WANG, Z.; et al.. The cloudsat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 12, p. 1771-1790, 2002.
- TARAVAT, A.; PROUD, S., PERONACI, S., DEL FRATE, F.; OPPELT, N. Multilayer Perceptron Neural Networks Model for Meteosat Second Generation SEVIRI Daytime Cloud Masking. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1529-1539, 2015.
- TAYLOR, P. C. The Role of Clouds: An Introduction and Rapporteur Report. **Surveys in Geophysics**, v. 33, n. 3, p. 609-617, 2012.
- BERTRAND, C.; DEMAIN, C.; JOURNÉE, M. Estimating daily sunshine duration over Belgium by combination of station and satellite data. **Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 8, p. 735-744, 2013.

- FREITAS, S.C.; TRIGO, I.F.; MACEDO, J.A.; BARROSO, C.; SILVA, R.; PERDIGÃO, R. Land surface temperature from multiple geostationary satellites. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 9-10, p. 3051-3068, 2013.
- TEGEN, I.; SCHEPANSKI, K.; HEINOLD, B. Comparing two years of Saharan dust source activation obtained by regional modelling and satellite observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 5, p. 2381-2390, 2013.
- TEMIMI, M.; GHEDIRA, H.; NAZARI, R.; SMITH, K.; KHANBILVARDI, R.; ROMANOV, P. An automated approach for sea ice mapping and ice concentration determination for the future GOES-R advanced baseline imager (ABI). In: **INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM** v. 4, n. 1, p. 1101-1104, Boston. **Anais...** IEEE, 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4779919/>>. Acesso: nov. 2017.
- THIES, B.; BENDIX, J. Satellite based remote sensing of weather and climate: Recent achievements and future perspectives. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 262-295, 2011.
- TIAN, Y.; ROMANOV, P.; Yu, Y.; XU, H.; TARPLEY, D. Analysis of vegetation index NDVI anisotropy to improve the accuracy of the GOES-R Green Vegetation Fraction product. In **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 2091-2094, Honolulu. **Anais...** IEEE, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5651925/>>. Acesso: nov. 2017.
- TILEV-TANRIOVER, S.; KAHRAMAN, A. Saharan dust transport by Mediterranean cyclones causing mud rain in Istanbul. **Royal Meteorological Society**, v. 70, n. 5, p. 145-150, 2015.
- TOMLINSON, C.J.; CHAPMAN, L.; THORNES, J.E.; BAKER, C. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 296-306, 2011.
- USPENSKII, A.B.; KUKHARSKII, A.V.; USPENSKII, S. A. Validation of the Results of the Satellite Monitoring of Land Surface Temperature. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 40, n. 2, p. 131-140, 2015.
- VANHELLEMONT, Q.; NEUKERMANS, G.; RUDDICK, K. Synergy between polar-orbiting and geostationary sensors: Remote sensing of the ocean at high spatial and high temporal resolution. **Remote Sensing of Environment** 146, 49-62, 2014.
- WMO. World Meteorological Organization and Intergovernmental Oceanographic Commission. **Systematic Observation Requirements For Satellite-Based Data**

- Products for Climate - 2011 Update.** Technical report, 2011. Disponível em: <https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3710>. Acesso: mar. 2017.
- XIE, H.; NALLI, N.R.; SAMPSON, S., WOLF, W.W.; LI, J.; SCHMIT, T.J.; et al. Integration and Ocean-Based Prelaunch Validation of GOES-R Advanced Baseline Imager Legacy Atmospheric Products. **Journal of American Meteorological Society**, v. 30, n. 8, p. 1743-1756, 2013.
- XU, H.; YU, Y.; TARPLEY, D.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F. S. Evaluation of GOES-R Land Surface Temperature Algorithm Using SEVIRI Satellite Retrievals with in Situ Measurements. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 52, n. 7, p. 3812-3822, 2014.
- YANG, J.; GONG, P.; FU, R.; ZHANG, M.; CHEN, J.; LIANG, S.; et al. The role of satellite remote sensing in climate change studies. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 875-883, 2014.
- ZHANG, D.; Tang, R.; ZHAO, W.; TANG, B.; WU, H.; SHAO, K.; Li, Z. Surface soil water content estimation from thermal remote sensing based on the temporal variation of land surface temperature. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3170-3187, 2014.
- ZHAO, W.; Li, A.; BIAN, J.; JIN, H.; ZHANG, Z. A synergetic algorithm for midmorning land surface soil and vegetation temperatures estimation using MSGSEVIRI products and TERRA-MODIS products. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, 2213-2238, 2014.
- ŽIBERT, M. I.; ŽIBERT, J. 2013. Monitoring and automatic detection of the cold-ring patterns atop deep convective clouds using Meteosat data. **Atmospheric Research**, v. 123, p. 281-292.

Capítulo 3 : Características e desafios de geração do NDVI para o Brasil a partir de dados do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10

Resumo

O monitoramento da cobertura do solo a partir de indicadores ambientais possibilita melhor conhecimento dos processos biofísicos e ecológicos, auxiliando na compreensão da dinâmica do uso do solo e na tomada de decisão. Satélites de órbita polar, em sua maioria, fornecem o produto NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) com média resolução espacial (250 m a 1 km) a partir de composições de imagens (7, 10 ou 16 dias). Por outro lado, satélites de órbita geoestacionária podem fornecer o NDVI com baixa resolução espacial (1 a 3 km) e alta resolução temporal (5 a 25 minutos). Particularmente, o primeiro satélite de órbita geoestacionária do qual se pode obter o NDVI foi o MSG, que se mostra eficiente para o monitoramento da vegetação para regiões da África, apresentando alta correlação espacial com dados de satélites polares, sendo utilizado na análise e detecção do estresse hídrico da vegetação e da fenologia com vantagens significativas na análise de séries temporais. No entanto, para o Brasil, existem limitações que precisam ser conhecidas para o desenvolvimento do produto NDVI MSG com qualidade. Esse artigo tem como objetivo apresentar uma revisão sobre o NDVI MSG, bem como discutir as principais características e desafios para obtenção do produto com melhor qualidade para o Brasil. Para tanto, são apresentadas as particularidades da influência das condições geométricas e atmosféricas sobre as bandas utilizadas para obtenção do NDVI, o histórico do desenvolvimento do NDVI MSG e uma discussão sobre os principais desafios do NDVI MSG para o Brasil, que estão relacionados às características de baixa resolução espacial, visada sobre o Brasil, correções atmosférica e geométrica e características da imagem pancromática e dos canais espectrais.

Palavras-chave: Meteosat-10, NDVI, índice ambiental.

3.1. Introdução

O monitoramento da cobertura do solo a partir de indicadores ambientais permite conhecer melhor os processos biofísicos e ecológicos (Filho et al., 2012), auxiliando na compreensão da dinâmica do uso do solo (Ferreira et al., 2006; Delgado et al., 2012) e tomada de decisão de gestores, bem como servindo de subsídio para definição de políticas públicas (Aguiar et al., 2011). Particularmente, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é definido por uma relação da diferença normalizada das reflectâncias das bandas espectrais do infravermelho próximo e vermelho (Tucker, 1979), e representa um indicador eficiente para o monitoramento da vegetação devido à sua simplicidade e estreita relação com a produtividade (Tian et al., 2015), sendo

considerado como o mais popular índice para estudar a saúde vegetal e produção de culturas (Atzberger, 2013). A Equação 3.1 apresenta o cálculo do NDVI proposto por Tucker (1979), qual seja:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3.1)$$

onde RED e NIR representam, respectivamente, as reflectâncias das bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo. Sendo que, as características do índice são definidas a partir de particularidades de reflectância de cada uma das bandas. A banda do vermelho apresenta alta reflectância em solos expostos e baixa em solos com grande cobertura vegetal; por outro lado, a banda do infravermelho próximo possui baixa reflectância em solos expostos e alta em solos com grande cobertura vegetal. Assim, os valores mais elevados de NDVI refletem maior vigor e capacidade fotossintética do dossel da vegetação, enquanto os valores mais baixos para o mesmo período refletem o estresse vegetativo, resultando em reduções de clorofila e alterações na estrutura interna das folhas (Tucker et al., 1979).

O NDVI constitui uma variável ambiental importante para o estudo das características da superfície do solo, sendo útil na estimativa de produtividade agrícola (Picoli et al., 2009), do fluxo de calor (Andrade et al., 2014), da precipitação em áreas com diferentes tipos de cobertura (Nicácio et al., 2009), de alguns atributos do solo para mesmo cultivo (Zanzarini et al., 2013) e do mapeamento da mistura do solo (Ahmad et al., 2010), dentre outros. Por meio de séries temporais do NDVI é possível analisar a variabilidade de condições meteorológicas na cobertura da superfície do solo e sua relação com outros indicadores ambientais (Barbosa et al., 2006a; Fensholt et al., 2009; Tian et al., 2015; Barbosa et al., 2015), bem como a identificação de fitofisionomias (Trentin et al., 2013).

Sensores a bordo de satélites orbitais têm sido utilizados extensivamente para o monitoramento da vegetação durante as últimas décadas. Satélites em órbita polar, em sua maioria, fornecem produtos NDVI com média resolução espacial (250 m a 1 km) a partir de composições de imagens (7, 10 ou 16 dias) (Solano et al., 2010; Tian et al., 2015). Por outro lado, satélites de órbita geoestacionária fornecem o produto NDVI com baixa resolução espacial (1 a 3 km), porém, com resolução temporal diária (Fensholt et al., 2006; Barbosa e Ertük, 2009a). Isso ocorre basicamente devido a diferença de resolução temporal dos satélites polares e geoestacionários: enquanto a maioria dos

satélites em órbita polar faz uma a duas leituras do pixel por dia, o geoestacionário pode fazer uma observação a cada 5 a 25 minutos. Assim, a presença de nuvens no momento de observação da superfície pelo satélite polar pode invalidar o dado do pixel, enquanto que o satélite de órbita geoestacionária terá outras oportunidades durante o dia para realizar uma leitura sem interferência das nuvens.

O satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 faz parte da série de satélites MSG (*Meteosat Second Generation*) do consórcio europeu EUMETCAST (EUMETSAT's Multicast Distribution System) cujo objetivo é fornecer dados confiáveis para aplicações de monitoramento climático e previsão do tempo aos países membro (EUMETSAT, 2016). O MSG destaca-se como a primeira série de satélites geoestacionários no mundo com bandas de vermelho e infravermelho próximo bastante úteis para o monitoramento da superfície terrestre e com alta resolução temporal (Schmetz et al., 2002). Na prática, o MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) com os satélites polares Terra e Aqua em um período de 16 dias pode obter até 32 observações durante o dia; no entanto, devido cobertura de nuvens no momento em que realiza a leitura (média global de 50 a 60%), a média de amostras com qualidade é de apenas 1 a 5 no período, sendo disponibilizado no produto o maior valor de NDVI com o menor ângulo de visada (Solano et al., 2010). Por outro lado, se considerado uma janela temporal de 4 horas em horário de alta iluminação solar (10:00 h às 14:00 hora local) para o MSG, é possível obter até 16 amostras em um único dia (Fensholt et al., 2006).

Porém, as bandas utilizadas para obtenção do NDVI sofrem influências que ocorrem devido a condições geométricas e atmosféricas, e que devem ser consideradas para obtenção de um índice de melhor qualidade. As bandas apresentam características anisotrópicas de reflectância, tal que o valor do NDVI depende da geometria de observação, especificamente os ângulos solar e de visada. Assim, conforme a variação dos ângulos (zenital e azimutal) do Sol e de visada do sensor, mesmo em uma superfície homogênea, ocorre alteração no sombreamento da vegetação e superfície do solo, que influenciam no valor do NDVI resultante (Fensholt et al., 2006). Ao mesmo tempo, a reflectância dessas bandas espectrais sofre influências atmosféricas no caminho sol-superfície-sensor devido à interação (reflexão, absorção, refração) com aerossóis dinâmicos, como aerossol troposférico, ozônio, vapor de água e nuvens (Vermote et al., 1997). Com efeito, foram desenvolvidas técnicas de correção geométrica e atmosférica que são utilizadas na correção da reflectância para obtenção do produto NDVI

proveniente de diferentes fontes de sensoriamento remoto, como os satélites MODIS (Vermote e Vermeulen, 1999), SPOT-VGT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre - Vegetation*) (Wolters et al., 2016) e AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) (Vermote e Claverie, 2013).

Além disso, a utilização do MSG para o Brasil implica na necessidade de investigação da influência de características que representam desafios pertinentes para obtenção do NDVI de melhor qualidade. Esse artigo tem como objetivo apresentar uma revisão sobre o NDVI MSG com o intuito de identificar características e discutir os principais desafios para obtenção do produto para o Brasil. Para tanto, apresenta características sobre as influências das condições geométrica e atmosféricas sobre o NDVI e uma revisão sobre o desenvolvimento e aplicações do NDVI MSG. Em seguida, são discutidos os principais desafios do índice para o Brasil, que são: a baixa resolução espacial, onde o pixel MSG apresenta mistura de diferentes classes de uso do solo; o ângulo de visada relativamente alto, que influencia na precisão da leitura da reflectância da superfície; o uso de técnicas de fusão de bandas, com o intuito de aumentar a resolução espacial do produto; e as diferenças espectrais das bandas do SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) com as bandas dos satélites polares mais utilizados para monitoramento da superfície do solo.

3.2. O NDVI e as influências das condições geométricas e atmosféricas

A correção dos efeitos angulares permite uma comparação de dados muito mais precisa entre diferentes locais e épocas do ano (Proud et al., 2014), podendo ser descrita como modelos que calculam a influência da geometria da cena sobre uma série de dados (Wanner et al., 1995). As principais vantagens do tratamento dos efeitos angulares são o potencial de maior acurácia comparado a modelos simples (Koukal et al., 2014; Proud et al., 2014) e a extração de informações adicionais (Wanner et al., 1995; Lyapustin et al., 2012; Moura et al., 2015).

Para tanto, considerando uma superfície coberta de vegetação esparsa (Figura 3.1), a reflectância na banda do vermelho é bastante anisotrópica em comparação com o infravermelho próximo, sendo maior no sentido de dispersão para trás (*backward scattering*) (Figura 3.1-a), devido cobertura vegetal e solo estarem iluminados. Por outro lado, a reflectância na direção de dispersão para frente (*forward scattering*) (Figura 3.1-b) é mais fraca, pois uma parte maior da vegetação e solo está sombreada. Já o *hotspot* ocorre quando o ângulo de fase entre Sol e visada tendem a zero (ambos em plano

principal com ângulos zenitais idênticos), iluminando com mais intensidade determinada área da superfície da vegetação e do solo, como visto na área central da ilustração (Figura 3.1-a). Por outro lado, em áreas de vegetação densa, as copas das árvores são vistas como uma superfície rugosa e, assim, a reflectância da banda do infravermelho próximo é mais isotrópica, sendo apenas ligeiramente maior na direção da dispersão para trás. Já a reflexão do infravermelho próximo na direção de dispersão para frente é maior, pois uma parte da radiação é transmitida através das copas e, assim, é refletida pelo solo e folhas (Fensholt et al., 2006). Calculando o NDVI no sentido dispersão para frente, a combinação de baixa reflectância do vermelho, e relativa alta reflectância no infravermelho próximo, gera valores de NDVI mais elevados, em comparação com a dispersão para trás. Assim, durante o dia, a reflectância bidirecional do NDVI para superfícies vegetadas e homogêneas geralmente apresenta forma de uma bacia (*bowl-shaped*), com diminuição dos valores de NDVI conforme se aumenta os ângulos solar e de visada (Fensholt et al., 2006).

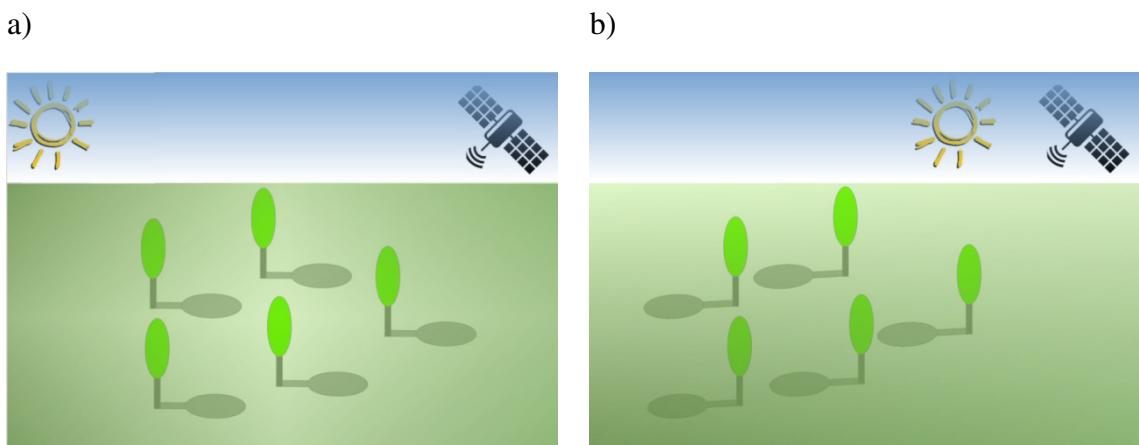


Figura 3.1. Características de reflexão da superfície devido à variação geométrica de iluminação solar e visada do satélite, sendo (a) dispersão para trás com a presença de hotspot na região central e (b) dispersão para frente.

A Figura 3.2 apresenta o comportamento do NDVI, RED e NIR de um pixel MSG durante o dia, conforme a variação dos ângulos de visada e solar. A amostra é de uma área de agricultura anual e sem contaminação de nuvens no município de Chapadão do Céu, estado de Goiás (dia 02/03/2014). Observa-se a variação do NDVI conforme a variação dos ângulos solares (azimutal e zenithal); como o satélite é geoestacionário, os ângulos de visada (azimutal e zenithal) são constantes. Pode-se identificar a variação do comportamento do NDVI durante o intervalo de 10:45 h às 13:15 h, em formato de uma bacia virada para baixo (*bowl-shaped*), bem como a respectiva variação de reflectância do RED e NIR, devido variação dos ângulos solares (azimutal e zenithal).

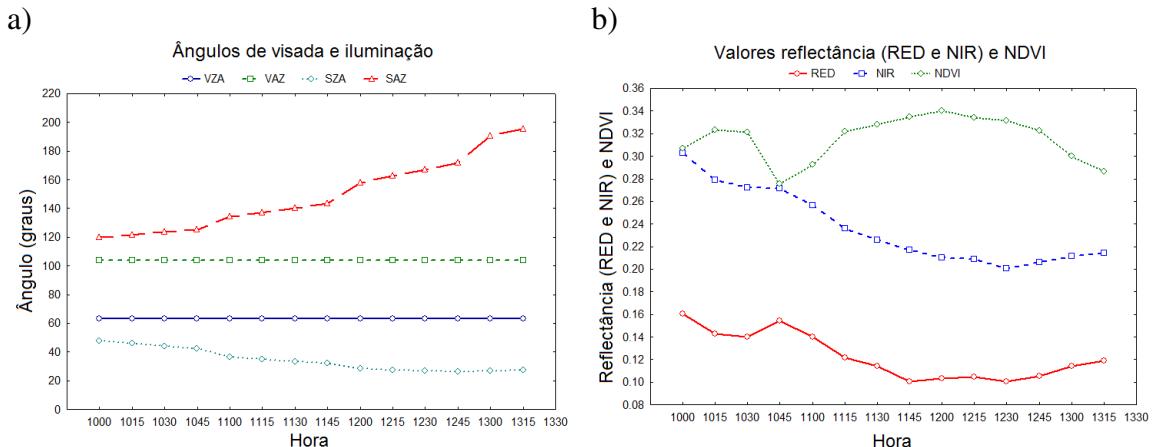


Figura 3.2. Comportamento no tempo dos ângulos de observação (direita) e reflectância dos canais RED e NIR e o NDVI (esquerda) durante o dia de uma amostra do satélite MSG em uma área de agricultura anual sem contaminação de nuvens no município de Chapadão do Céu, estado de Goiás, dia 02/03/2014, intervalo de 10:00 h às 13:15 h horário de Brasília. Sendo os ângulos zenital e azimutal de visada VZA e VAZ, respectivamente, e os ângulos zenithal e azimuthal solar SZA e SAZ, respectivamente.

A estimativa da Função de Reflectância Bidirecional da Superfície, ou BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), de superfícies com cobertura vegetal é feita a partir de modelos que se diferem nos detalhes com que descrevem os processos físicos responsáveis pela difusão da luz, que se deve ao tipo de cobertura do solo e o número de observações necessárias para derivar os parâmetros do modelo (Wanner et al., 1995). Assim, modelos físicos descrevem a difusão da luz explicitamente e os empíricos através de funções matemáticas adequadas. Naturalmente, os modelos físicos são considerados mais complexos que seus similares empíricos. Em termos de complexidade, modelos semi-empíricos estão entre esses dois: são matematicamente mais simples, mantendo suas características principais, e necessitam de poucos parâmetros de entrada e de amostras para cálculo de estimativa (Wanner et al., 1995; Schaaf et al., 2002). O modelo semi-empírico de núcleos dirigidos busca representar a superfície através da suposição linear de um conjunto de núcleos que juntos se complementam para representar as características de reflexão da superfície. Assim, basicamente, a reflectância da superfície é vista como uma combinação de dois diferentes núcleos (Roujean et al., 1992): o núcleo de dispersão geométrica, que considera a reflexão difusa da superfície do dossel e efeitos de sombreamento e núcleo de dispersão volumétrica, que considera a reflexão e absorção das folhas das árvores de um dossel.

Já a correção atmosférica considera os efeitos de interação da radiação solar com as camadas atmosféricas da Terra, com o intuito de fornecer melhor precisão nas medidas de reflectância da superfície. Com efeito, uma proporção da radiação recebida

pelo sensor corresponde à radiação refletida ou espalhada pela atmosfera que nem mesmo interagiu com a superfície. Da mesma forma, parte da radiação refletida pela superfície é atenuada pelo espalhamento e absorção da atmosfera. Além disso, aerossóis dinâmicos da atmosfera, como vapor de água, ozônio e AOT (*Tropospheric Aerosol Optical*) afetam processos atmosféricos (absorção e difusão) que modificam a radiância solar refletida por um alvo quando vista do espaço (Rahman e Dedieu, 1994; Vermote et al., 1997). A Figura 3.3 ilustra o balanço energético da radiação solar e as diferentes interações com a atmosfera e superfície do solo. Observa-se que a maior parte da radiação solar medida pelos sensores de satélites corresponde à radiação refletida pela atmosfera e nuvens (23%), enquanto uma pequena parte corresponde à reflexão da superfície do solo (7%) (Trenberth et al., 2009). Assim, é preciso conhecer as características atmosféricas para estimar a interferência causada ao sinal medido pelo sensor, obtendo assim informações mais precisas da superfície (Tucker, 1979; Vermote et al., 1997; Jones e Vaughan, 2010).

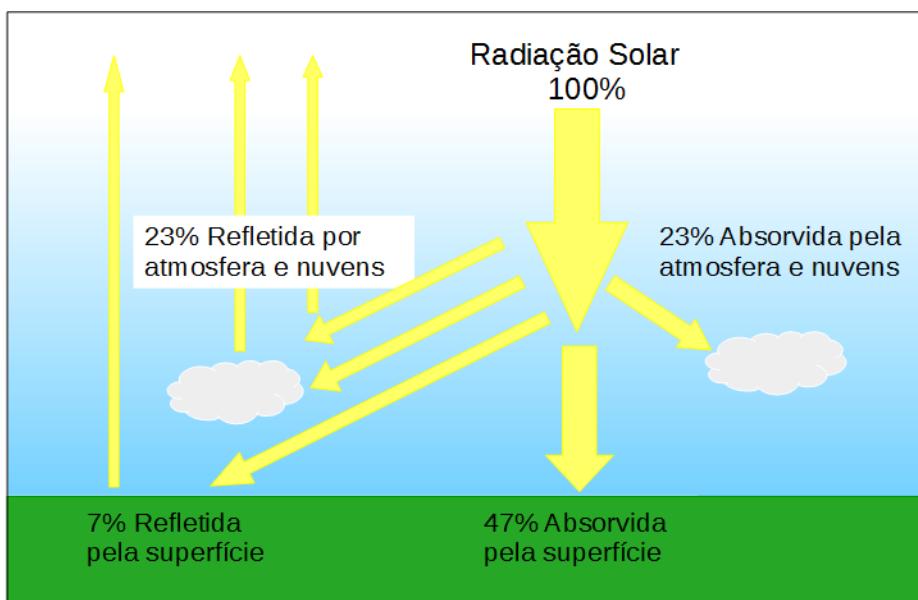


Figura 3.3. Ilustração das interações da radiação solar com a atmosfera e superfície do solo. Adaptado de Trenberth et al. (2009).

A modelagem desses efeitos utiliza equacionamento matemático complexo e de alto custo computacional, por isso são preferidas técnicas de simulação para estimativa e correção atmosférica (Vermote et al., 1997). Tais técnicas, para a correção de cada pixel, necessitam de parâmetros de entrada relacionados aos aerossóis dinâmicos da atmosfera (aerossol troposférico, ozônio e vapor de água) e os ângulos de visada e iluminação (zenital e azimutal) (Kotchenova et al., 2008). O 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*) é um código avançado de transferência radiativa

projetado para simular a reflexão da radiação solar utilizando um sistema atmosfera-superfície-sensor para uma ampla gama de condições atmosféricas, espectrais e geométricas (Vermote et al., 1997). A técnica apresenta um bom desempenho sobre superfícies homogêneas lambertianas e anisotrópicos (Kotchenova e Vermote, 2007), particularmente utilizado no algoritmo de correção atmosférica MODIS (Qu et al., 2014). Entretanto, o código executa uma simulação e pode demandar tempo considerável, logo a execução do algoritmo 6S pode se tornar inviável para aplicações em tempo quase-real. Por outro lado, o SMAC (*Simplified Method for the Atmospheric Corrections*) é um método baseado em fórmulas analíticas simplificadas para correção atmosférica, menos preciso do que o 6S, no entanto, tem como vantagem o processamento mais rápido (Rahman e Dedieu, 1994).

3.3. Histórico do NDVI MSG

Mesmo antes do lançamento do MSG, foi destacado o seu potencial para o monitoramento de propriedades da superfície do solo e aplicações biosféricas, especificamente a vegetação, a partir dos canais do vermelho e infravermelho próximo (Govaerts, 1998). Estudos demonstraram alta correlação entre o NDVI máximo do MSG comparado ao AVHRR e SPOT-VGT, destacando melhor eficiência das imagens MSG para eliminar a contaminação por nuvens, devido repetição temporal de imagens; no entanto, observou-se a necessidade de estudos relacionados a correções de efeitos atmosféricos e geométricos para obtenção do NDVI MSG (Sarr e Lacaze, 2008).

Investigações iniciais utilizavam a composição de imagens pelo valor máximo, com o intuito de minimizar a influência das nuvens, sendo possível a identificação de interferências devido à geometria de iluminação do satélite ou mesmo contaminação por aerossóis de queimadas (Barbosa et al., 2006b). Posteriormente, Barbosa e Ertük (2009a) apresentaram um algoritmo de extração dos valores máximos, médios e mínimos do NDVI, demonstrando que o mesmo poderia ser utilizado para o monitoramento da dinâmica espacial da cobertura da vegetação.

Fensholt et al. (2006) estudaram o BRDF em vários tipos de vegetação e diferentes condições geométrica de obtenção do NDVI MSG. Para tanto, fizeram uso do SMAC para as correções atmosféricas, sendo que os parâmetros de condições atmosférica (vapor de água, aerossol e ozônio) foram obtidos a partir de produtos diários MODIS (MOD08 e MYD08) (Hubanks et al., 2015). Os resultados demonstraram a evidente diferença de anisotropia das bandas vermelho e infravermelho

próximo, conforme a variação de ângulos solar e de visada em diferentes classes de vegetação, que influem diretamente no valor do NDVI observado. A técnica apresentou como característica vantajosa, em relação a satélites polares, a geração do índice em menores intervalos de tempo, desde que feitas devidas correções geométrica e atmosférica (Fensholt et al., 2006). Aprofundando na correção atmosférica das bandas do vermelho e infravermelho próximo (Proud et al., 2010a) identificaram que o algoritmo SMAC produz resultados de boa precisão, comparado ao algoritmo 6S, apenas em ângulos solares menores do que 30° e em boas condições atmosféricas (vapor de água < 2 gm/cm² e ozônio < 0,25 cm/Atm). No entanto, através da análise de erro comparado aos resultados do 6S, foram inseridas equações para correção de erro das principais variáveis comuns para os dois algoritmos, como transmissão atmosférica (gasosa e não gasosa), albedo da superfície e reflectância atmosférica (Proud et al., 2010b).

Neste período, Ertürk et al. (2010) apresentaram um produto NDVI disponibilizado em intervalo diária e década, podendo ser obtido por link direto (via satélite) ou via *home page* da EUMETSAT (Eumetsat, 2011). Para tanto, são necessários pelo menos 10 amostras sem contaminação de nuvens no dia para calcular a correção geométrica utilizando a técnica BRDF de núcleos dirigidos (Roujean et al., 1992). Com o intuito de minimizar erros de cálculo, o BRDF foi calculado a partir de mapas de uso do solo, sendo utilizadas tabelas tipo LUTs (*Look-Up Tables*) para fornecer os respectivos valores dos núcleos isométrico, geométrico, volumétrico e especular.

Posteriormente, Proud et al. (2014) propuseram a correção geométrica a partir de um algoritmo similar ao algoritmo BRDF MODIS utilizado para geração do produto Albedo (Schaaf et al., 2002). Porém, enquanto que no MODIS esse peso depende de vários parâmetros de entrada (aerossol, tipo de nuvem e sombreamento), para o método proposto, o NBAR (*BRDF-Adjusted Reflectance*), o valor desse peso depende dos ângulos zenital de visada e solar, em que, quanto maior a soma dos ângulos, menor o peso da amostra. Fez-se uso de correção atmosférica com o algoritmo SMAC utilizando ajustes de erro, conforme apresentados em Proud et al. (2010b). Identificou-se que dados NDVI MSG são satisfatórios para regiões da África com resolução temporal de cinco dias apresentando maior qualidade de dados do que satélites polares, como o MODIS, devido à alta quantidade de amostras de qualidade, mesmo no período de chuvas (Fensholt et al., 2011).

Outras aplicações com o NDVI MSG estão relacionadas com a utilização para estimativa da temperatura da superfície, validada com dados de estações meteorológicas (Nieto et al., 2011); o monitoramento da seca, supondo uma evolução gradual de estresse da vegetação identificado com o uso de funções de pertinência de lógica fuzzy (Rulinda et al., 2010); a variação sazonal de vegetação e umidade do solo (Rasmussen et al., 2011), visando a estimativa da temperatura do solo e da vegetação através da relação negativa com os valores de NDVI correspondente; o monitoramento fenológico para identificação de fases de desenvolvimento dos cultivos (Sobrino et al., 2013); a avaliação da sinergia entre os satélites MODIS e MSG com uso das vantagens (espacial e temporal) de cada satélite (Zhao et al., 2014). Especificamente para o Brasil, mesmo em alto ângulo de visada, o NDVI MSG apresenta um grande potencial de aplicações, no entanto, são pouco investigadas, devido falta de confiabilidade nos dados e dificuldades operacionais na obtenção e processamento de dados de satélites geoestacionários. Com efeito, as aplicações se resumem na análise do produto (Borges, 2010), na estimativa da emissividade e cálculo da temperatura da superfície (Dantas e Ferreira, 2010) e na obtenção do NDVI a partir da composição de imagens pelo valor máximo (Barbosa et al., 2006b). No entanto, alguns estudos buscam conhecer melhor esse dado, seja através da análise das características espaciais do NDVI comparado a satélites polares (Silveira et al., 2015), seja para aplicação no estudo da fenologia e uso do solo (Correia e Silveira, 2015).

3.4. Desafios para geração do NDVI MSG para o Brasil

3.4.1. Baixa resolução espacial

O pixel MSG apresenta maior resolução espacial comparado com dados de satélite de órbita polar e, consequentemente, apresenta maior generalização do valor do NDVI (Silveira et al., 2015). Uma vez que, para o pixel MSG, mesmo em uma região que represente uma grande área de mesma classe de uso do solo, possui dentro do pixel áreas de outras classes em menor proporção. Como por exemplo, um pixel MSG classificado como pastagem possivelmente apresenta algumas pequenas áreas de outras classes de uso, como vegetação natural ou agricultura. Dessa forma, o pixel MSG representa a leitura da reflectância de uma mistura de diferentes classes de uso do solo.

Como exemplo, a Figura 3.4 apresenta um pixel MSG classificado como pastagem, em uma região de Goiás com predominância de áreas de pastagens, conforme

a classificação do Mapa TerraClass 2013 (BRASIL, 2013). Como o pixel MSG corresponde a uma área de 3 x 3 km e o pixel MODIS das bandas RED e NIR uma área de 250 x 250 m, o pixel MSG corresponde a uma matriz de pixels MODIS. A imagem apresenta a variação topográfica da área, gerada a partir de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com exagero topográfico (x3). Através da escala do índice de vegetação percebe-se que o NDVI MODIS é substancialmente maior do que o NDVI MSG e consegue representar as características da vegetação com maior confiabilidade. Já o MSG apresenta maior generalização das características fenológicas por representar toda a área com um único valor de NDVI.

Tal característica pode limitar aplicações dos dados MSG quando se necessita de caracterização cartográfica, principalmente em áreas com maior diversidade de classes de uso do solo. Além disso, devido o tamanho do pixel é preciso levar em consideração a ocorrência de nuvens de subpixel, nuvens com área inferior a área do pixel. Essas nuvens podem não serem detectadas pelos algoritmos de máscara de nuvens, porém influenciam na reflectância das bandas RED e NIR e, consequentemente, no valor do NDVI (Proud et al., 2014). Para tanto, uma alternativa confiável seria utilizar a banda pancromática para identificação de nuvens de subpixel, a partir do uso de mapas de uso do solo e limiares pré-definidos (Bley e Deneke, 2013).

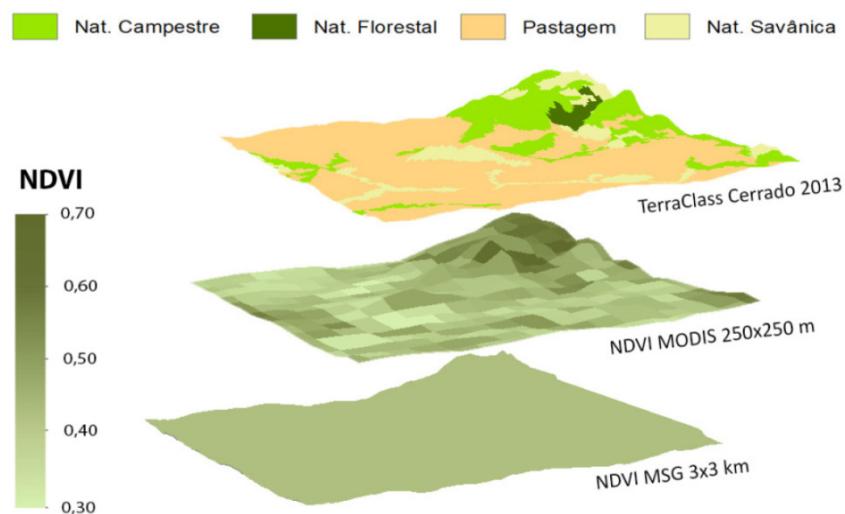


Figura 3.4. Resolução espacial de um pixel MSG (3 x 3 km) com predominância de pastagem, comparado ao produto NDVI do MODIS (250 x 250 m) em área correspondente. Utilizou-se a classificação do TerraClass Cerrado 2013 (BRASIL, 2013), dados topográficos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com exagero topográfico (x3).

3.4.2. Visada sobre o Brasil

O MSG cobre boa parte do Brasil possibilitando a utilização de seus produtos e bandas espectrais para diversos tipos de aplicações. O mesmo tem sido utilizado no Brasil para geração do NDVI (Barbosa et al., 2006b; Barbosa e Ertük, 2009a; Borges, 2010; Barbosa et al., 2014; Silveira et al., 2015), estimativa da temperatura do solo (Nieto et al., 2011), caracterização de nuvens e tempestades (Barbosa e Ertük, 2009b; da Cruz, 2009; Barbosa et al., 2011, 2012). Tais aplicações foram desenvolvidas, em sua maioria, em áreas de estudo localizadas nas regiões Nordeste e Sudeste, o qual apresentam menores ângulos de visada e, consequentemente, maior qualidade da imagem. Porém, as imagens fornecidas pelo sistema EUMETCAST excluem todo o estado do Acre e parte do oeste do estado de Amazonas por estarem localizados em regiões extremas do sensor SEVIRI (ângulo de visada maior do que 75°). A Figura 3.5 apresenta o mapa de variação do ângulo de visada do MSG para o Brasil. Nota-se que boa parte do Brasil apresenta ângulo de visada alto, acima de 60° , e nessas condições ocorre uma queda na qualidade dos resultados de algoritmos de correção geométrica e atmosférica.

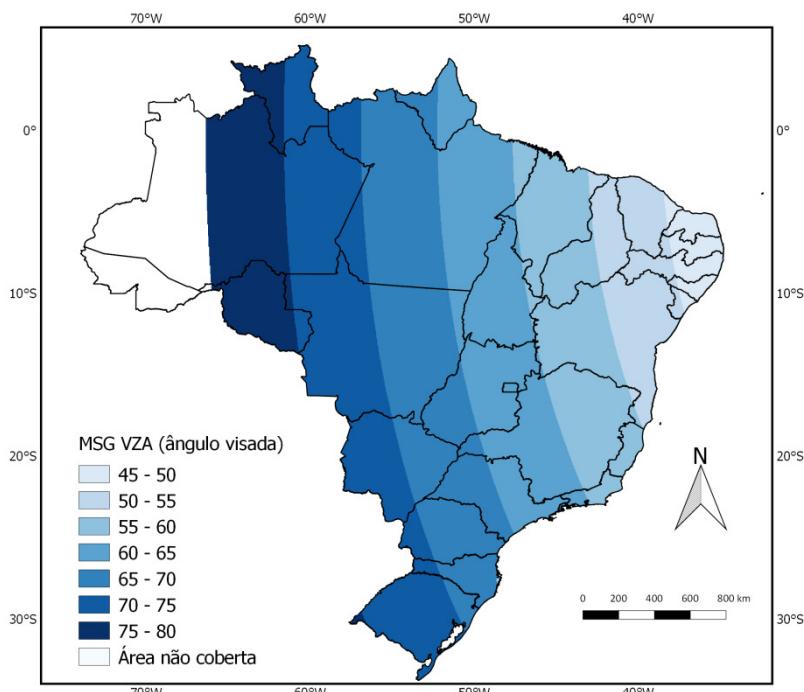


Figura 3.5. Mapa da variação do ângulo de visada, em graus, do MSG (MSG VZA) para o Brasil, excluindo áreas não cobertas devido ângulo de visada maior do que 75° , correspondentes ao estado do Acre e oeste do Amazonas.

O pixel MSG possui resolução espacial a nadir de 1 km para a banda pancromática e 3 km para as demais bandas. No entanto, a precisão desse dado diminui conforme

aumenta o ângulo de visada, isso porque o pixel vai apresentar uma maior área de visada instantânea do sensor na superfície do solo, conhecido como GIFOV (*Ground Instantaneous Field of View*). Para o MSG essa degradação de resolução é linear até 65°, e aumenta exponencialmente acima desse valor. A Figura 3.6 ilustra essa característica, onde um pixel localizado a 0° de latitude e longitude (VZA = 0) possui a resolução espacial de 3 x 3 km, mesma resolução das imagens multiespectrais disponibilizadas pela EUMETSAT. Já para a observação de um pixel com longitude 55° (VZA = 55°) ocorre uma modificação da resolução espacial para 6,1 x 3,3 km (EUMETSAT, 2015), causado devido o aumento do GIFOV. Isso acarreta no aumento da correlação entre os pixels próximos, uma vez que o valor da reflectância de um pixel possui também informação dos seus pixels vizinhos (Cracknell, 1998). Dessa forma, para ângulos de visada altos ocorre uma considerável mistura entre os pixels da vizinhança que, consequentemente, diminui a qualidade da informação daquele pixel.

Essa característica também influencia a qualidade da banda pancromática, que apresentará um GIFOV maior conforme o aumento do ângulo de visada. Consequentemente, ao avaliar a operação de fusão de bandas (pancromática e multiespectral), com o intuito de aumentar a resolução espacial do NDVI MSG, os resultados podem não ser satisfatórios.

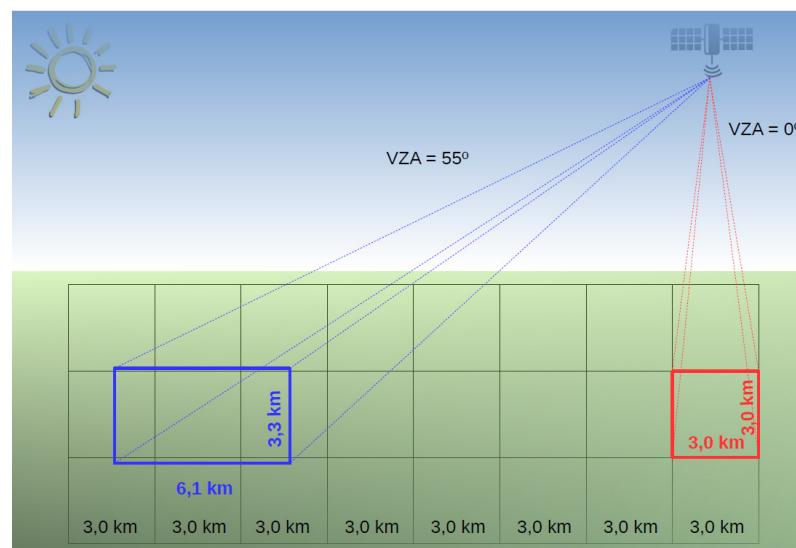


Figura 3.6. Ilustração da variação do GIFOV (*Ground Instantaneous Field of View*) do MSG para um pixel no nadir (VZA = 0°), com resolução espacial de 3 x 3 km, e outro a 0° de latitude e 55° de longitude (VZA = 55°) com 6,1 x 3,3 km.

3.4.3. Correções atmosférica e geométrica

Com relação à correção atmosférica, o algoritmo SMAC apresenta resultados de qualidade apenas para baixos ângulos de visada (menores do que 30°), o que inviabiliza

a aplicação para o Brasil (Proud et al., 2010a). Para tanto, uma alternativa é o algoritmo SMAC-corrigido, que apresenta alterações no método de cálculo SMAC a fim de reduzir as diferenças comparadas à técnica 6S. Apesar das melhorias, ainda há condições sob as quais a técnica apresenta baixa precisão, principalmente quando o ângulo zenital de visada ou solar é elevado (superior a 60°), sendo ainda importante verificar as condições atmosféricas antes de tirar conclusões a partir de dados SMAC-corrigido (Proud et al., 2010b).

Por outro lado, o 6S fornece resultados de melhor qualidade para ângulos de até 80° (Vermote et al., 1997), perfazendo toda a área do Brasil monitorada pelo sensor SEVIRI, que apresenta ângulo menores do que 75°. Porém, como esse algoritmo representa uma simulação, o tempo de execução é significativo, ainda mais se for considerado que a correção atmosférica seja feita em cada pixel a cada 15 minutos, intervalo que corresponde à resolução temporal do MSG. Em um estudo prático, Proud et al. (2010b) avaliaram que uma imagem do MSG recortada para a África e parte do Oriente Médio, com os canais do vermelho, infravermelho próximo e ondas curtas em um computador dedicado e de alta velocidade requer aproximadamente 25 segundos de tempo de execução para SMAC, e para o 6S esse tempo seria de mais de 20 minutos. Como o MSG fornece imagens a cada 15 minutos, isto significa que o 6S mostra-se incapaz de processar o dado rápido o bastante, demonstrando que o 6S não se mostra adequado para a correção atmosférica em tempo quase-real de grandes conjuntos de dados (Proud et al., 2010b). Uma alternativa é a utilização de LUT baseada nos resultados do algoritmo 6S, tendo com entrada a reflectância das bandas e as condições geométricas (ângulos de visada e iluminação) e atmosféricas (aerossol troposférico, ozônio e vapor de água) e como saída os parâmetros de correção atmosférica (xa , xb e xc) (Lee et al., 2015); tal técnica é utilizada para a correção atmosférica do algoritmo do produto de reflectância diária MOD09 (Vermote e Vermeulen, 1999).

Já em relação à correção geométrica, o modelo semi-empírico de núcleos dirigidos apresenta resultados satisfatórios para representação da cobertura da superfície do solo (Wanner et al., 1995; Ertürk et al., 2010). Para tanto, é necessário definir so núcleos geométrico e volumétrico que melhor representam a cobertura do solo. Sendo que, em estudos para o MSG, foram avaliados os modelos de Roujean no produto NDVI da EUMETSAT (Ertürk et al., 2010) e o modelo *Li-Sparse Ross-Thick* (Proud et al., 2014), que é o similar ao utilizado para estimativa de albedo do MODIS (Schaaf et al., 2002). O núcleo geométrico *Li-Sparce* modela a geometria dos corpos da superfície

(árvores) como de distribuição esparsa, conforme os ângulos de observação e visada. O núcleo volumétrico *Ross-Thick* modela o volume da copa da árvore com maior densidade de folhas, conforme os ângulos de observação e visada. Esses modelos são aceitáveis para a correção geométrica para o Brasil, principalmente em áreas de pastagem por apresentar poucas árvores e com maior densidade de folhas (Bruziguesi, 2016).

3.4.4. Características da imagem pancromática

A partir da imagem pancromática e das imagens dos canais multiespectrais, os quais fazem parte do espectro de frequência da imagem pancromática, utilizam-se diferentes técnicas de fusão de bandas para obter uma imagem dos canais multiespectrais com a mesma resolução espacial do que a banda pancromática (Amro et al., 2011; Vivone et al., 2014; Alparone et al., 2015). Devido limitações dos detectores e processo de varredura o MSG fornece uma imagem pancromática que modifica a área de cobertura conforme a hora do dia, sendo o movimento de leste para o oeste. Como o Brasil está localizado mais a oeste da latitude do MSG, com ângulo de visada variando de 40° a 80°, as imagens pancromáticas com cobertura sobre o Brasil são geradas das 14:00 h às 17:00 h, horário de Brasília. A Figura 3.7 apresenta uma sequência de imagens pancromáticas no intervalo de 11:00 h às 14:00 h. Observa-se que a cobertura completa sobre o Brasil ocorre a partir das 14:00 h, excluindo áreas não cobertas, correspondentes ao estado do Acre e oeste do Amazonas. Com efeito, a imagem pancromática pode ser utilizada para aumentar a resolução espacial dos canais multiespectrais, porém é preciso saber que o intervalo de tempo em que essa imagem é gerada para o Brasil é limitado.

No entanto, a janela temporal comumente utilizada para obtenção do NDVI é de 10:00 h às 14:00 h, hora local. Dessa forma, o uso da banda pancromática para a melhoria da resolução espacial do NDVI MSG deve levar em consideração essa diferença de intervalos para obtenção dos dados. Por outro lado, considerando a janela temporal de 3 horas de dados da banda pancromática, é possível gerar até 12 imagens de alta resolução, que podem auxiliar na diminuição da influência das nuvens na operação de fusão de bandas.

Além disso, os algoritmos de fusão de bandas comumente operam em imagens de satélites em que as bandas multiespectrais e pancromática são geradas ao mesmo tempo, sendo necessário identificar alternativas para que o ruído causado,

principalmente devido à diferença de cobertura de nuvens das imagens, não resulte em uma imagem com menor qualidade do que a imagem multiespectral de maior resolução espacial.

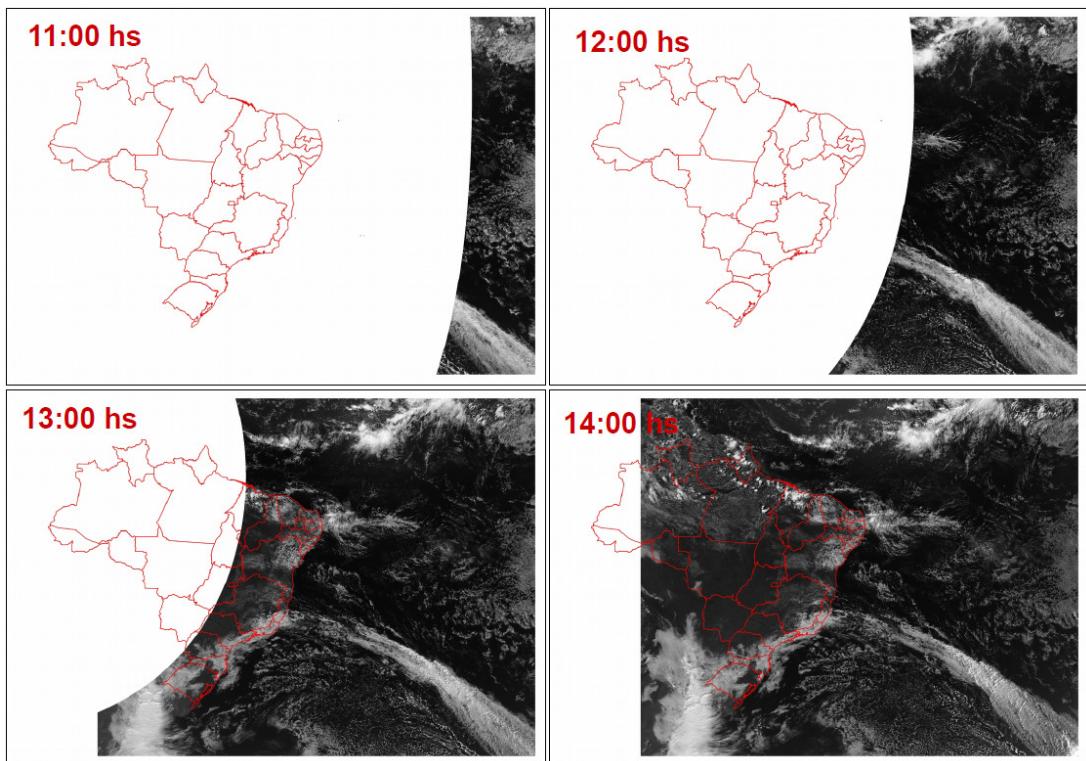


Figura 3.7. Dinâmica da varredura da banda Pancromática do MSG sobre o Brasil no intervalo de 11:00 h às 14:00 h, horário de Brasília, excluindo estado do Acre e oeste do Amazonas.

3.4.5. Características dos canais espectrais

Os satélites polares mais utilizados para o monitoramento da superfície são o MODIS e Landsat-8. Para esses satélites os canais RED e NIR, utilizados para obter o NDVI, apresentam características bastante similares, conforme mostrado na Figura 3.8: são estreitos, com largura de banda de 50 nm para o RED e 35-40 nm para o NIR, e com pouca diferença entre os limites superior e inferior para o RED (630-680 nm Landsat-8 e 620-670 nm MODIS) e NIR (845 - 885 nm Landsat-8 e 841-876 nm MODIS).

Por outro lado, o MSG possui uma largura de banda de 150 nm para o RED e 140 nm para o NIR, cobrindo uma região espectral bem mais larga do que os mesmos canais do MODIS e Landsat-8. Tal característica representa uma diferença relevante para o NDVI MSG comparado ao NDVI MODIS e Landsat-8, e pode resultar em um índice de vegetação um pouco diferente, se consideradas as mesmas condições geométricas e atmosféricas.

Já o canal pancromático do MSG (400-1.100 nm) cobre a região espectral do RED (560-710 nm) e NIR (740-880 nm), logo estes canais podem ser utilizados no

processo de fusão de bandas, permitindo assim obter o NDVI MSG de alta resolução espacial. No Landsat-8, o canal pancromático (500-680 nm) cobre apenas os canais do espectro visível, deixando de fora o canal NIR (845-885 nm), o que inviabiliza aumentar a resolução espacial para esta banda e, consequentemente, não podendo aumentar a resolução espacial para o NDVI obtido.

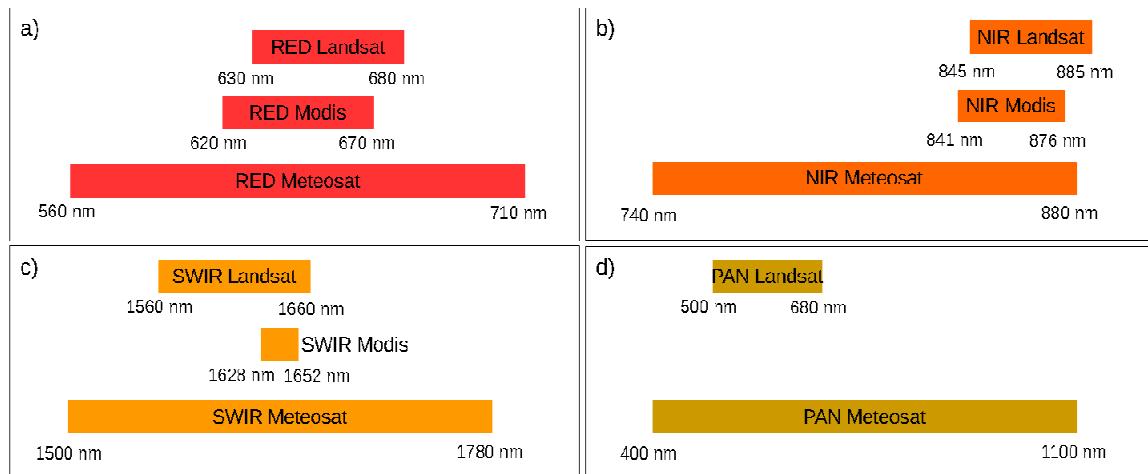


Figura 3.8. Comparação visual entre os canais (a) RED (vermelho), (b) NIR (infravermelho próximo), (c) SWIR (infravermelho de ondas curtas) e (d) PAN (pancromática) dos satélites MSG, MODIS e Landsat-8.

3.5. Conclusão

O MSG é um satélite de órbita geoestacionária de resolução temporal bastante favorável para diversas aplicações ambientais. O mesmo representa a primeira série de satélites geoestacionários que possui as bandas espectrais RED e NIR, permitindo a obtenção do NDVI e o monitoramento da superfície do solo em tempo quase real, com perspectiva de geração de imagens diárias. Vários estudos apresentam aplicações do NDVI MSG para estudo da fenologia e parâmetros ambientais relacionados principalmente sobre a África. Entretanto, o MSG cobre grande parte do Brasil, possibilitando a utilização para o monitoramento ambiental com alta resolução temporal, permitindo observar a superfície do solo em lacunas durante o dia sem cobertura de nuvens.

Porém, devido influência que a atmosfera e corpos da superfície têm sobre a reflectância medida pelo sensor, para obtenção do NDVI MSG de melhor qualidade se faz necessária a aplicação de técnicas de correção geométrica e atmosférica, sendo vastos os estudos relacionados. A correção geométrica utilizando modelos semi-empíricos de núcleos dirigidos é a mais utilizada com o MSG, fornecendo resultados

satisfatórios para baixos ângulos de visada. No entanto, devido o alto ângulo de visada para o Brasil, e consequente aumento do GIFOV, é preciso avaliar quais modelos de núcleo geométrico e volumétrico podem fornecer melhores resultados. Ademais, a correção atmosférica mostra-se bastante importante para o MSG, sendo utilizadas duas alternativas bastante distintas, as técnicas SMAC e 6S. Entretanto, para alto ângulo de visada o 6S se apresenta como a melhor alternativa, sendo viável no processamento em tempo quase real através da utilização de LUTs.

Mesmo que as bandas multiespectrais tenham uma resolução espacial considerada baixa (3 km no nadir), a banda pancromática possibilita imagens das bandas do NDVI (RED e NIR) com menor resolução espacial (1 km no nadir), o que permite aumentar a resolução do pixel do NDVI MSG diário de 3 km para 1 km, ampliando as possibilidades de aplicação deste produto. No entanto, devido à dinâmica do MSG para geração da banda pancromática é preciso identificar uma melhor forma de utilizá-la com o intuito de melhorar a resolução espacial do dado multiespectral sem aumentar o ruído do produto. Em virtude do alto ângulo de visada, é preciso avaliar a qualidade do produto resultante, devido o aumento considerável do GIFOV e a mistura de pixels.

Como descrito por Fisher (1997) no artigo intitulado “*The pixel: a snare and a delusion*” (“O pixel: uma armadilha e uma desilusão”), o pixel obtido pelo sensoriamento remoto apresenta complexidades que não podem ser ignoradas, sendo importante o empenho em pesquisas com o intuito de proporcionar melhor compreensão das particularidades, permitindo assim reconhecer suas próprias limitações. Isso não é diferente para os dados do MSG, que apresenta características e limitações específicas que devem ser consideradas para obtenção do produto NDVI MSG para o Brasil. O conhecimento de tais particularidades pode ser útil para que, em etapas de processamento, permitam viabilizar a obtenção de um produto com maior confiabilidade e qualidade, bem como reconhecendo as limitações do produto gerado. Ademais, pode-se utilizar esse estudo como referencial para a obtenção do NDVI a partir de dados da nova série de satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que também cobrem o Brasil, porém com menor ângulo de visada e, a partir do sensor ABI (*Advanced Baseline Imager*), que apresenta como vantagens menor resolução espacial (500 m a 2 km) e um canal de reflectância do azul, que permite a utilização de técnicas para eliminação de ruídos, como poluição do ar e outros aerossóis.

3.6. Referências

- AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; MELLO, M. P.; SILVA, G. B. S.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; et al. Monitoramento agroambiental do setor sucroenergético: contribuições do sensoriamento remoto orbital para a certificação ambiental do cultivo da cana-de-açúcar. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Curitiba. *Anais...* Brasilia: EMBRAPA, 2011. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/42851/1/Gustavo5-SBSR.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2017. p. 132-139.
- AHMAD, S.; KALRA, A.; STEPHEN, H.; Estimating soil moisture using remote sensing data: a machine learning approach. **Advances in Water Resources**, v. 33, n. 1, p. 69-80, 2010.
- ALPARONE L.; AIAZZI B.; BARONTI S.; GARZELLI A. **Remote Sensing Image Fusion**. (ebook) New York: CRC Press: Taylor & Francis Group, 2015, 328 p.
- AMRO, I.; MATEOS, J.; VEGA, M.; MOLINA, R.; KATSAGGELOS, A. K. A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing** v. 79, p. 1-22, 2011.
- ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J.M.; MENEZES, S. J. M. C. Estimativa de Produtividade da Cana-de-açúcar utilizando o SEBAL e Imagens LANDSAT. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 433-442, 2014.
- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 949-981, 2013.
- BARBOSA, H. A.; ACCIOLY FILHO, J. B. P.; MELCÍADES, W. L. B.; MELLO, N. G. S.; SOUZA, J. M. D. Determinação do índice de vegetação através de imagens Meteosat-8. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO. *Anais...* Aracaju, 2006b. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/artigos_pdf/074_t.pdf>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 1-5.
- BARBOSA, H. A.; DA SILVA, L. R. M.; SANTOS, A. M.; NETO, C. P. S. A Step Beyond Visualization: How to Ingest Meteosat Second Generation Satellite Data and Product into MCIDAS-V, ILWIS and TerraMA. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 1-15, 2014.

- BARBOSA, H. A.; ERTÜK, A. G. Índice diário de vegetação estimado com imagens multiespectrais do satélite Meteosat Segunda Geração. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Natal, 2009a. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.21.58/doc/5617-5624.pdf>>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 5617-5624
- BARBOSA, H. A.; ERTÜK, A. G. Utilização de imagens Meteosat de segunda geração para a detecção e monitoramento de sistemas convectivos severos atuantes no Brasil. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Natal, 2009b. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.29/doc/1641-1646.pdf>>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 1641-1646
- BARBOSA, H. A.; ERTÜRK, A. G.; DA SILVA, L. R. M. Using the Meteosat-9 images to the detection of deep convective systems in Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 69-82, 2012.
- BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the northeast region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, p. 288-307, 2006a.
- BARBOSA, H. A.; JUNIOR, I. W. D. S.; ERTÜK, A. G.; PRIETO, J. The cloud-top SEVIRI data for monitoring convective storms. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Curitiba, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0906.pdf>>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 2179-2186.
- BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; SILVA, L. R. M. Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall. **Natural Hazards**, v. 77, n. 2, p. 883- 899, 2015.
- BLEY, S.; DENKE, H. A threshold-based cloud mask for the high-resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n.10, p. 2713–2723, 2013.
- BORGES, L. A. **Estimativa de NDVI no Estado de Minas Gerais Utilizando Imagens dos Satélites CBERS_2B/CCD e MSG/SEVIRI**. 2010. Dissertação (Mestrado em Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Escola de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento do Uso e Cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado**, Brasília, DF, 2015. 69 p.

- BRUZIGUESSI, E. P. (2016). Árvores nativas do cerrado na pastagem: Por quê? Como? Quais? **Tese de doutorado**. Publicação PPGEFL. TD - 299/ 2015, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade de Brasília - UnB, Brasília. 163 p.
- CORREIA, L. H.; SILVEIRA, C. R. Índice de vegetação de satélite geoestacionário para análise temporal fenológica do Cerrado em Goiás. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA. **Anais...** Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <http://eventos.uepg.br/sbiagro/2015/anais/SBIAgro2015/pdf_resumos/20/20_leandro_henrique_correia_177.pdf>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 1–4.
- CRACKNELL, A.P.; 1998. Review article Synergy in remote sensing what's in a pixel ? **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2025–2047.
- DA CRUZ, P. P. N. **Utilização dos Canais Multiespectrais do Sensor SEVIRI na Detecção de Sistemas Convectivos Severos no Sudeste Brasileiro - Estudos de Casos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.
- DANTAS, A.A.A.; FERREIRA, E. Land Surface Temperatures From Meteosat-9 Satellite In Minas Gerais State. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International. **Proceedings...** Honolulu, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5649705/>>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 2241-2243.
- DELGADO, R. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, M. H.; SOARES, V. P.; ANDRADE, R. G. Classificação espectral de área plantada com a cultura da cana-de-açúcar por meio da árvore de decisão. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 369-380, 2012.
- ERTÜRK, A. G.; ELLIOTT, S.; BARBOSA, H.; SAMAIN, O.; HEINEMANN, T. **Pre-operational NDVI product derived from MSG SEVIRI**, 2010. Disponível em: <www.eumetsat.int>. Acesso: 10 mai. 2017.
- EUMETSAT. **Eumetsat Home Page**, 2016. Disponível em: <www.eumetsat.int>. Acesso: 10 mai. 2017.
- EUMETSAT. **MSG Meteorological Products Extraction Facility Algorithm Specification Document**, 2011. Disponível em: <www.eumetsat.int>. Acesso: 10 mai. 2017.
- EUMETSAT. **Support software & tools**, 2015. Disponível em: <<http://www.eumetsat.int/website/home/Data/DataDelivery/SupportSoftwareandTools/index.html>>. Acesso: 10 mai. 2017.
- FENSHOLT, R.; ANYAMBA, A.; HUBER, G. S.; PROUD, S. R.; TUCKER, C.; SMALL, J.; et al. Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary

MSG SEVIRI data compared to polar operational environmental satellite data for land surface monitoring in Africa. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 721-729, 2011.

FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, K.; NIELSEN, T.T.; MBOW, C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends: Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1886-1898, 2009.

FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; STISEN, S.; TUCKER, C. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 212-229, 2006.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R.; PECCININI, A. A. "Análise comparativa dos produtos MODIS Ecologia para o monitoramento biofísico ambiental do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 1–10, 2002.

FILHO, S.; NUNES, G. M.; ROBERTO, C.; FILHO, D. S. Discriminação de Fitofisionomias na Amazônia Central por meio de Índices de Vegetação de Imagens com resolução espacial moderada. **Geografia Acadêmica**, v. 1, p. 5-14, 2012.

FISHER, P. The Pixel: A Snare and a Delusion. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 3, p. 679–85, 1997.

GOVAERTS, Y. Potential of Meteosat Second Generation for the monitoring of land surface properties, In: WORKSHOP ON MODELLING AND DATA ASSIMILATION FOR LAND SURFACE PROCESSES. **Proceedings...** Darmstadt, 1998. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/1998/9625-potential-meteosat-second-generation-monitoring-land-surface-properties.pdf>>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 74-78.

HUBANKS P., PATNICK S., KING M., e RIDGWAY B. MODIS Atmosphere L3 Gridded Product Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) & Users Guide, 2015. Disponível em: <https://modis-images.gsfc.nasa.gov/_docs/L3_ATBD_2008_12_04.pdf>. Acesso: 26 out. 2017.

KOTCHENOVA S. Y.; VERMOTE E. F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data . Part II . Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. **Applied Optics**, v. 46, n. 20, 2007.

KOTCHENOVA, S. Y.; VERMOTE, E. F.; LEVY, R.; LYAPUSTIN, A. Radiative transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study. **Applied Optics**, v. 47, n. 13, p. 2215–2226, 2008.

- KOUKAL, T.; ATZBERGER, C.; SCHNEIDER, W. Evaluation of semi-empirical BRDF models inverted against multi-angle data from a digital airborne frame camera for enhancing forest type classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 151, p. 27–43, 2014.
- LEE, C. S.; YEOM, J. M.; LEE, H. L.; KIM, J. J.; HAN, K. S. Sensitivity analysis of 6S-based look-up table for surface reflectance retrieval. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 1, p. 91–101, 2015.
- LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; LASZLO, I.; HILKER, T.; G.HALL F.; SELLERS, P. J.; et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, 127:385–393, 2012.
- MOURA, Y. M.d.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; GALVÃO, L. S. SANTOS, J. R.d.; ANDERSON L. O; et al. Seasonality and drought effects of Amazonian forests observed from multi-angle satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 278–290, 2015.
- NICÁCIO, R. M.; ARAÚJO, L. L.; GONZAGA, E. P.; LIBOS, M. I. P de; OLIVEIRA, L. M. T. de. Relação NDVI e precipitação na bacia do rio Coxim - MS. **Geografia**, v. 34, p. 667-680, 2009.
- NIETO, H.; SANDHOLT, I.; AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; STISEN, S. Air temperature estimation with MSG-SEVIRI data: Calibration and validation of the TVX algorithm for the Iberian Peninsula. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 107-116, 2011.
- PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 789-795, 2009.
- PROUD, S. R.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SANDHOLT, I. A comparison of the effectiveness of 6S and SMAC in correcting for atmospheric interference of Meteosat Second Generation images. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D17209, p. 1 – 14, 2010a.
- PROUD, S. R.; SCHAAF, C.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SHISANYA, C.; MUTERO, W.; et al. The Normalization of Surface Anisotropy Effects Present in SEVIRI Reflectances by Using the MODIS BRDF Method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 10, p. 6026 – 6039, 2014.
- PROUD, S.R.; RASMUSSEN, M. O.; FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; SHYSANYA, C.; MUTERO, W.; et al. Improving the SMAC atmospheric correction code by analysis

- of Meteosat Second Generation NDVI and surface reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114 n. 8, p. 1687-1698, 2010b.
- QU, Y.; LIU, Q.; LIANG, S.; WANG, L.; LIU, N.; LIU, S. Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from modis data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p.907–919, 2014.
- RAHMAN, H.; DEDIEU, G. “SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum.” **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 1, p. 123–43, 1994.
- RASMUSSEN, M. O.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F. S.; SANDHOLT, I. 2011. Directional Effects on Land Surface Temperature Estimation From Meteosat Second Generation for Savanna Landscapes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 11, p. 4458-4468, 2011.
- ROUJEAN J.-L.; LEROY M.; DESCHAMPS P.-Y. A bidirectional reflectance model of the Earth’s surface for the correction of remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. 92, p. 20.455 – 20.468, 1992.
- RULINDA, C. M., BIJKER, W., e STEIN, A. Image mining for drought monitoring in eastern Africa using Meteosat SEVIRI data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12S, p. S63–S68, 2010.
- SARR, M. A.; LACAZE, B. Caractérisation de la dynamique de la végétation en Afrique de l’Ouest : comparaison des indices NDVI de MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR (exemple du Ferlo, Sénégal). In Texte issu d’une communication au colloque Météosat Seconde Génération : un nouvel outil de suiv., p. 1–10, 2008. Disponível em: <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260971>>. Acesso: out. 2017.
- SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83 n. 1-2, p. 135–148, 2002.
- SCHMETZ, J.; PILI, P.; TJEMKES, S.; JUST, D.; KERKMANN, J.; ROTA, S.; RATIER, A. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 7, p. 991–991, 2002.
- SILVEIRA, C. R.; MESQUISTA, V. V.; GUIMARÃES, L. F. Análise da generalização cartográfica em imagens índice de vegetação geradas a partir de dados Meteosat Second Generation. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO

- REMOTO. Anais... João Pessoa, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0131.pdf>>. Acesso: 10 mai. 2017. p. 0683-690.
- SOBRINO, J. A.; JULIEN, Y.; SORIA, G. Phenology estimation from meteosat second generation data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1653–1659, 2013.
- SOLANO, R.; DIDAN, K.; JACOBSON, A.; HUETE, A. 2010. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)**. Disponível em: <https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf>. Acesso: 10 mai. 2017.
- TIAN, E.; FENSHOLT, R.; VERBESSELT, J. GROGAN, K.; HORION, S.; WANG, Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 163, p. 326-340, 2015.
- TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; & KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311–323, 2009.
- TRENTIN, A. B.; SALDANHA, D. L.; KUPLICH, T. M. Análise comparativa do ndvi em fitofisionomias na bacia hidrográfica do Rio São Marcos. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 5–16, 2013.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment** v. 150, p. 127-150, 1979.
- VERMOTE, E. F.; TANR, D.; DEUZ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.-j. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum , 6S : An Overview. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675–686, 1997.
- VERMOTE, E. F.; VERMEULEN, A. **Atmospheric Correction Algorithm: Spectral Reflectances (MOD09)**. ATBD version 4. 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf> Acesso: 26 out. 2017. 1–107 p.
- VERMOTE, E.; CLAVERIE, M. **Climate Algorithm Theoretical Basis Document (C-ATBD) AVHRR Land Bundle - Surface Reflectance and Normalized Difference Vegetation Index**. 2013. Disponível em: https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/sds/cdr/CDRs/AVHRR%20Surface%20Reflectance/AlgorithmDescription_01B-20a.pdf. Acesso: 02 nov. 2017. 38 p.
- VIVONE, G.; ALPARONE, L.; CHANUSSOT, J.; MURA, M. D.; GARZELLI, A.; LICCIARDI, G.A.; et al. A Critical Comparison Among Pansharpening Algorithms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, n. 5, p. 2565-2586, 2015.

WANNER, W.; LI X.; STRAHLER, A. H. On the derivation of kernel for kernel-driven models of bidirectional reflectance. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 21.077–21.089, 1995.

WOLTERS, E.; SWINNER, E.; TOTÉ, C.; STERCKX, S. **SPOT-VGT Collection 3 Products User Manual**. 2016. Disponível em: <http://www.vgt.vito.be/pages/SPOT_VGT_PUM_v1.0.pdf>. Acesso: 2 nov. 2017. 51 p.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. 2013. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608-614.

ZHAO, W.; Li, A.; BIAN, J.; JIN, H.; ZHANG, Z. 2014. A synergetic algorithm for mid-morning land surface soil and vegetation temperatures estimation using MSG-SEVIRI products and TERRA-MODIS products. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 2213-2238.

Capítulo 4 : Avaliação de técnicas para melhoria da qualidade do NDVI MSG para o monitoramento da superfície do solo

Resumo

Os satélites geoestacionários representam uma alternativa de alta resolução temporal para o monitoramento da superfície do solo, comparado aos comumente utilizados satélites polares. O Meteosat-10 possui as bandas do vermelho e infravermelho próximo, e representa a primeira série de satélite de órbita geoestacionária capaz de fornecer o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Porém, em altos ângulos de visada alguns fatores influenciam na reflectância da superfície diminuindo a qualidade dos índices de vegetação, sendo importante avaliar o uso de técnicas de correção atmosféricas e geométricas, bem como fusão de bandas com o intuito de melhorar a qualidade do índice. Esse artigo tem como objetivo avaliar dados do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 para obtenção do índice de vegetação NDVI com qualidade em regiões de alto ângulo de visada, tendo como área de estudo o estado de Goiás. Adotar-se-ão imagens MODIS (*MODerate Image Spectroradiometer*) como referência para identificar características temporais das observações para composição do produto e avaliar a performance de abordagens de fusão de bandas, correção geométrica e atmosférica. O período da base de dados de estudo foi de 2013 a 2015. Como resultado o NDVI MSG, obtido no intervalo de 10:00 h às 12:00 hora local, apresenta alta correlação ($p > 0,8$) com o MOD09, sendo capaz de obter uma imagem sobre o estado de Goiás com 95% de cobertura de pixels, no intervalo de 12 dias, enquanto o MOD09 obtém no intervalo de 16 dias. Porém, a máscara de nuvens do MSG apresenta alta porcentagem de erro (21%) onde os pixels MOD09 marcam toda a área como livre de nuvem. O uso da banda pancromática na operação de fusão de bandas não agregou melhorias aos resultados. A correção geométrica é um ajuste fino que, nestas análises, não apresentou aumento da correlação dos dados. Por outro lado, a correção atmosférica mantém a correlação dos dados e aumenta o valor do NDVI, aproximando mais ao valor NDVI MODIS. Ao realizar uma aplicação de PCA com dados MSG e MODIS, percebe-se que os produtos conseguem abstrair padrões de sazonalidade de uso do solo. Entretanto, ao aplicar a técnica de classificação não-supervisionada k-médias, o NDVI MSG forneceu resultados superiores ao MODIS, com concordância substancial para agricultura anual ($K = 0,73$) e considerável para pastagem ($K = 0,35$) e natural ($K = 0,34$), demonstrando o potencial de dados geoestacionários para o monitoramento da superfície do solo.

Palavras-chave: MSG, NDVI, 6S, BRDF, satélite de órbita geoestacionária.

4.1. Introdução

O monitoramento da cobertura do solo utilizando dados de sensoriamento remoto permite a compreensão de processos superficiais em diferentes escalas espacial e temporal. As novas gerações de satélites de órbita geoestacionária apresentam bandas espectrais que permitem o monitoramento da superfície com baixa resolução espacial (500 m a 3 km) e alta resolução temporal (10 a 25 minutos). Isso se tornou possível a partir da série MSG (*Meteosat Second Generation*) e, mais recentemente, obtendo cobertura global com as novas séries Himawari e GOES (Thies e Bendix, 2011).

Dentre os satélites da série MSG, o Meteosat-10 mostra-se eficiente para o monitoramento da vegetação a partir do índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para regiões da África, apresentando alta correlação espacial com dados de satélites polares (Sarr e Lacaze, 2008; Fensholt et al., 2011), sendo utilizado na análise e comportamento do estresse da vegetação (Rulinda et al., 2010, 2011) e estimativas de fenologia (Sobrino et al., 2013). Este índice é definido pela diferença normalizada das bandas espectrais do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (RED) (Tucker, 1979) e representa um indicador eficiente para o monitoramento da vegetação devido à simplicidade e estreita relação com a produtividade da vegetação (Tian et al., 2015), sendo considerado o mais popular índice para estudo da saúde vegetal e produção de culturas (Atzberger, 2013).

Entretanto, em regiões consideradas de alto ângulo de visada (p. ex. 50° a 75°) os índices de vegetação do MSG são menos utilizados para monitoramento da superfície do solo, devido a fatores que diminuem a qualidade da medida de refletância dos sensores orbitais, tais como: a) o aumento do campo de visada da superfície, que acarreta no aumento da correlação dos pixels vizinhos (Cracknell, 1998); b) o aumento do caminho ótico dos fótons, que acarreta no aumento da influência das condições atmosféricas (gases e aerossóis) sobre a refletância da superfície (Sobrino et al., 2013); c) o aumento das sombras dos corpos da superfície e nuvens devido geometria de observação, que acarreta na variação do valor do NDVI durante o dia (Roujean et al, 1992). Com efeito, para melhoria da qualidade dos índices de vegetação é importante utilizar técnicas para diminuir as influências de condições atmosféricas (Vermote et al., 1997b) e geométricas (Wanner et al., 1995), da mesma forma, mostra-se relevante avaliar a fusão de bandas multiespectrais e pancromática com o intuito de aumentar a resolução espacial do índice de vegetação.

Esse artigo tem como objetivo avaliar dados do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 para obtenção do índice de vegetação NDVI com qualidade em regiões de alto ângulo de visada, tendo como área de estudo o estado de Goiás. Adotar-se-ão imagens MODIS (*MODerate Image Spectroradiometer*) como referência para identificar características temporais das observações para composição do produto e avaliar a performance de abordagens de fusão de bandas, correção geométrica e atmosférica. O período da base de dados de estudo foi de 2013 a 2015.

4.2. Materiais e Métodos

A área de estudo foi o estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal, que está em quase sua totalidade dentro do bioma Cerrado (Figura 4.1-a). A área de estudo apresenta alto ângulo de visada para o MSG, variando de 50 a 65° (Figura 4.1-b), sendo que nessas condições o caminho ótico do pixel, comparado ao pixel a nadir, aumenta e sofre mais influências das condições atmosféricas, como também o sombreamento dos corpos da superfície é maior e mais complexo, influenciando na medida de reflectância da superfície, conforme apresentado na ilustração (Figura 4.1-c).

As principais etapas envolvidas para avaliação e obtenção do NDVI MSG de qualidade são apresentadas no fluxograma da Figura 4.2, sendo cada etapa descrita nos tópicos a seguir. O diagrama ampliado, constando as bases de dados utilizadas para cada etapa, bem como as imagens resultantes, é apresentado no Apêndice A.1.

Inicialmente, definiu-se o intervalo de observações do dia para obtenção do NDVI MSG diário, segundo critérios técnicos estabelecidos. O produto foi então utilizado para análise e definição do intervalo de dias para obtenção da composição do NDVI MSG. Para tanto, fez-se um estudo sobre o produto máscara de nuvens do MSG. Na etapa seguinte o NDVI MSG diário obtido foi utilizado para o processamento das técnicas de fusão de bandas, correção atmosférica e correção geométrica. Os resultados desse processamento foram avaliados na etapa seguinte, sendo definido assim, quais técnicas foram utilizadas para obtenção do NDVI MSG de qualidade. A última etapa relacionou-se à aplicação do produto obtido com o intuito de identificar a capacidade de abstração de sazonalidade e classificação do uso do solo.

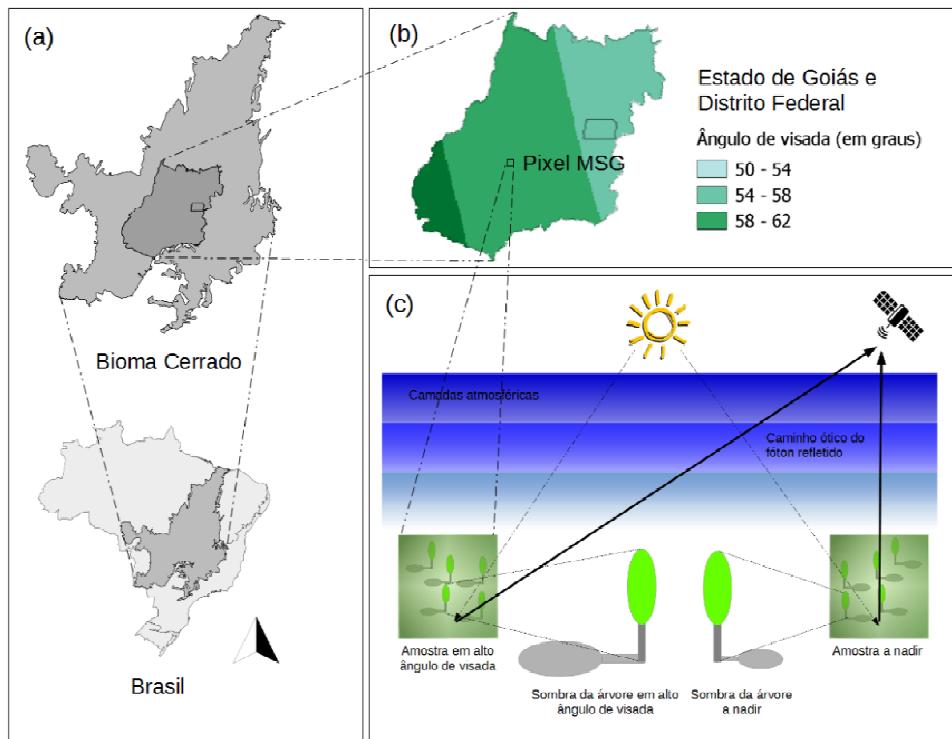


Figura 4.1. Área de estudo, sendo: o estado de Goiás, incluindo Distrito Federal, dentro do Bioma Cerrado, no Brasil (a); ângulo de visada do MSG para a área de estudo (b); ilustração de diferenças entre um pixel a nadir e de alto ângulo de visada (c).

Para o processamento envolvido no estudo foi utilizada a linguagem python, tendo como ferramenta base para processamento de imagens a biblioteca GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*) que é livre, robusta e com muitos recursos disponíveis para processamento de imagens, sendo bastante utilizada no sensoriamento remoto (GDAL, 2017). Foram desenvolvidas rotinas para obtenção de imagens multiespectral e pancromática, máscara de nuvens, obtenção dos ângulos de observação, correção geométrica, correção atmosférica, fusão de bandas, análises estatísticas, dentre outras. Também foram utilizados bibliotecas e algoritmos desenvolvidos em pesquisas relacionadas à correção geométrica, atmosférica e fusão de bandas (Wilson, 2013; Toolbox, 2016; GomesDans, 2015).

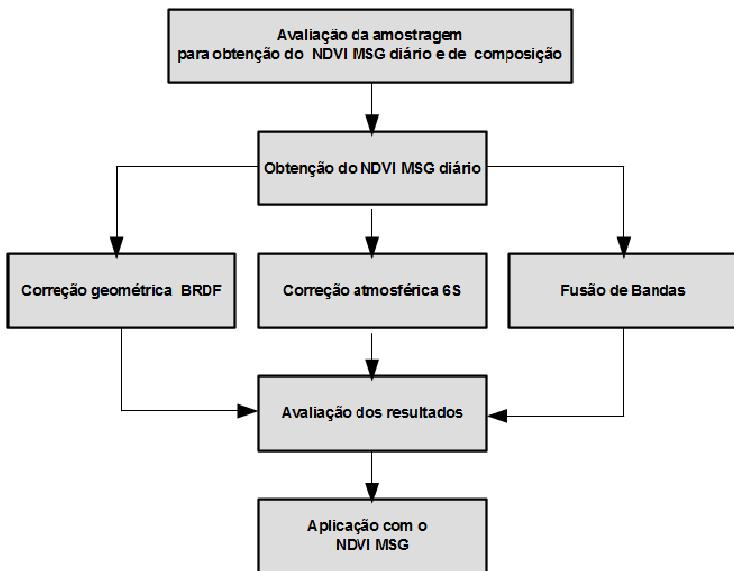


Figura 4.2. Fluxograma da metodologia utilizada para obter e avaliar o NDVI MSG.

4.2.1. Seleção de subintervalo e obtenção do NDVI MSG diário

O MSG possui resolução temporal de 15 minutos fornecendo imagens durante todo o dia. No entanto, como as bandas utilizadas para obtenção do NDVI são de reflectância da luz solar, selecionou-se, para a análise, imagens no intervalo que apresenta maior iluminação solar (das 10:00 h às 14:00 h) (Fensholt et al., 2006). Neste intervalo foram avaliados diferentes subintervalos de tempo (p. ex. das 10:00 h às 12:00 h, das 11:00 h às 13:00 h, etc.) com o intuito de selecionar um subintervalo para utilizar nos estudos sobre o NDVI MSG. Para tanto, foram definidos três critérios a ser avaliados para cada subintervalo de tempo. O primeiro é a correlação estatística do NDVI MSG com o produto MODIS de reflectância diária (MOD09); para tanto foram selecionados pontos dentro de grandes áreas de diferentes classes de uso (agricultura anual, pastagem e paisagem natural) a partir do mapa de uso do solo do Projeto TerraClass Cerrado - Mapeamento do Uso e Cobertura Vegetal do Cerrado (BRASIL, 2015), sendo considerados subintervalos com o coeficiente de correlação de Pearson (r) maior do que 0,80. Os outros dois critérios representam de certa forma, a influência de presença de nuvens nos diferentes subintervalos de tempo avaliados, sendo: a média mensal de amostras sem cobertura de nuvens, tendo como limiar valor maior do que 15 amostras/mês/pixel, e a média de pixels sem leitura, tendo como limiar valor menor que 30 pixels/mês para cada imagem. Tais limiares foram definidos a partir de testes realizados sobre os dados.

Selecionado o subintervalo de tempo pode-se então obter a imagem diária do NDVI MSG livre de nuvens, utilizado nas etapas posteriores deste estudo. Em seguida,

avaliou-se a disponibilidade de dados para a área de estudo através da análise de imagens da média de amostras por pixel durante o mês, bem como a partir de gráficos de porcentagem de cobertura em diferentes intervalos de dias (1 a 20 dias) para obtenção de uma imagem. Da mesma forma, considerando a influência de cobertura de nuvens nas imagens obtidas, foi feita uma análise comparativa entre máscaras de nuvens MSG e MODIS utilizando a máscara de nuvens do produto diário MOD09 e a máscara de nuvens MSG de 10:30 h, hora local, que é o horário mais próximo à passagem do satélite MODIS Terra, que fornece o produto MOD09.

Para esses processamentos foram utilizados dados HRIT (*High-Rate Image Transmission*) nível 1.5, que são imagens georreferenciadas e radiometricamente pré-processadas com resolução espacial de 3 km. Para obtenção do NDVI MSG nos subintervalos, foi selecionado, para cada pixel, o valor de NDVI obtido no menor horário sem cobertura de nuvens, sendo, para isso, utilizado o produto máscara de nuvens (CLM, *Cloud Mask*), disponibilizado pela EUMETSAT. O NDVI MOD09 foi obtido a partir do produto diário MOD09GA que fornece a refletância diária da superfície (L2G) com resolução espacial de 500 m, e possui uma banda de informações sobre a qualidade do pixel (*cloud state*), utilizada para obtenção de sua máscara de nuvens (Vermote e Kotchenova, 1999).

4.2.2. *Fusão de bandas*

A fusão de bandas é a combinação sinérgica de dois ou mais conjuntos de dados de imagens, destinados a produzir um conhecimento dos fenômenos sob investigação melhor do que os conhecimentos realizáveis a partir de conjuntos de dados individuais (Alparone et al., 2015). Utilizando a operação de fusão entre as bandas multiespectrais (RED e NIR) e a pancromática pode-se obter o NDVI MSG com resolução espacial de 1 km. Porém, existe uma particularidade para o campo de visada do Brasil que aumenta a complexidade da aplicação dessa técnica: diferente da maioria de operações de fusão de bandas, em que o dado das bandas multiespectrais e pancromática é obtido ao mesmo tempo, a imagem pancromática do MSG para o Brasil pode ser obtida apenas no intervalo de 14:00 h às 17:00 h, hora local, enquanto que a imagem do NDVI MSG da banda multiespectral é obtido no intervalo de 10:00 h às 14:00 h, hora local. Isso ocorre devido a dinâmica dos sensores pancromáticos que ficam, na maior parte do dia, focados na África e Europa. Dessa forma, a fusão de bandas proposta apresenta certa distinção das técnicas convencionais, sendo realizada conforme as seguintes etapas:

- 1) Fusão de bandas pancromática e multiespectral: fez-se a fusão de bandas da imagem pancromática e das bandas multiespectrais utilizadas (RED e NIR) de mesmo horário, no intervalo de imagens pancromáticas. Para tanto, utilizou-se a técnica LMVM (*Local Mean and Variance Matching*) que faz uso de métricas de qualidade espectrais e espaciais e é reconhecida como uma das três melhores técnicas de fusão de bandas (Karathanassi et al., 2007; Nikolakopoulos, 2008; Witharana et al., 2013). O resultado é uma imagem de fusão composta pelas bandas RED e NIR com resolução espacial de 1 km, sendo uma imagem para cada intervalo de 15 minutos. Como o intervalo de tempo para obtenção de imagens pancromática pode influenciar no resultado da operação de fusão de bandas, devido a presença de nuvens e consequente diminuição da quantidade de pixels da imagem, foram avaliados dois intervalos de tempo de imagens pancromáticas: das 14:00 h às 15:00 h, em que se obtém 5 imagens, e das 14:00 h às 16:00 h, em que se obtém 9 imagens pancromáticas.
- 2) Composição de imagem com pixels sem cobertura de nuvens: para cada imagem resultante da etapa anterior fez-se a seleção do valor de pixel para as bandas RED e NIR, sendo esse valor do pixel sem cobertura de nuvens e com menor horário. Para tanto, fez-se uso da máscara de nuvens para o horário específico de cada imagem, reprojetada, utilizando convolução cúbica, e reamostragem para 3 km. O resultado é uma única imagem de fusão do dia com resolução espacial de 1 km, composto pelas bandas NDVI, RED e NIR.
- 3) Fusão do NDVI MSG da banda pancromática com NDVI MSG de maior resolução espacial: fez-se uma operação de fusão de bandas entre a imagem de menor resolução espacial resultante da etapa anterior com o NDVI MSG diário de 3 km. Para tanto, foi utilizada a técnica HPF (*High Pass Filter*), que torna mais aparente a informação da banda de menor resolução especial presente nas bandas multiespectrais de maior resolução espacial (Schowenge, 1980), destacando assim a informação da banda pancromática, mesmo com dados obtidos em intervalos de tempo distintos (Béthune et al., 1997). No entanto, devido à dinâmica das nuvens durante o dia, e como são imagens obtidas em intervalos de tempo distintos, a fusão de bandas foi aplicada apenas para os pixels representados nas duas imagens, o que resulta em

menos pixels com valores do que outras técnicas; no entanto, está livre desse tipo de ruído. Com essa consideração, a técnica foi chamada de HPF modificada. O resultado dessa operação corresponde ao NDVI MSG diário com resolução 1 km composto pelas bandas NDVI, RED e NIR.

Detalhes sobre as etapas descritas, bem como ilustração da operação de fusão de bandas, podem ser vistos no Apêndice A.2.

4.2.3. *Correção geométrica*

A correção geométrica permite remover a influência da geometria da cena sobre uma série de dados (Wanner et al., 1995). O cálculo dos efeitos angulares do BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* ou Função de Reflectância Bidirecional da Superfície) permite uma comparação de dados muito mais precisa entre diferentes locais e épocas do ano (Proud et al., 2014). Esse cálculo é feito a partir de modelos lineares que se diferem nos detalhes com que eles descrevem os processos físicos responsáveis pela difusão da luz (Wanner et al., 1995).

O modelo semi-empírico de núcleos dirigidos, em particular, busca representar a superfície através da suposição linear de um conjunto de núcleos que juntos se complementam para representar as características de reflexão (isométrica, volumétrica e geométrica) da superfície (Roujean et al., 1992). Neste estudo foram utilizados os núcleos *Ross-Thick* e *Li-Sparse* no processamento de correção geométrica do produto NDVI MSG, similar aos núcleos utilizados no algoritmo do produto Albedo MODIS (Wanner et al., 1995; Schaaf et al., 2002). O núcleo geométrico *Li-Sparse* representa áreas com distribuição esparsa de corpos na superfície (árvores) e o núcleo *Ross-Thick* corpos na superfície com grande volume de folhas. Outras opções de núcleos (geométrico e volumétrico) foram avaliadas para cálculo do BRDF e foram descritas no Apêndice A.3, entretanto os núcleos utilizados nesse estudo são os que apresentaram melhor resultado.

Como alternativa à ocorrência de falhas de cálculo, devido grandes variações dos ângulos de iluminação, ou poucas amostras no dia, utilizaram-se parâmetros obtidos no dia anterior (Silveira et al., 2017). Para o cálculo de correção geométrica e atmosférica necessita-se dos ângulos que representam a geometria (azimutal e zenithal) de visada e iluminação que foram obtidos a partir do processamento de algoritmos disponibilizados pela EUMETCAST no pacote Geonetcast Toolbox (Maathuis et al., 2013), que

apresenta resolução espacial dos ângulos de 0,45°, sendo o dado reprojetado utilizando convolução cúbica e remostragem para 3 km.

4.2.4. Correção atmosférica

O sinal medido por um sensor de satélite contém uma combinação de contribuições da atmosfera e da superfície, e é preciso conhecer as características atmosféricas para estimar a interferência causada no sinal medido, obtendo assim informações de maior qualidade da reflectância da superfície (Jones e Vaughan, 2010). Assim, são propostas técnicas de correção atmosférica que se diferenciam pela complexidade e tempo de processamento. O SMAC (*Simplified Method for the Atmospheric Correction*) (Rahman e Dedieu, 1994) é um método baseado em fórmulas analíticas simplificadas para correção atmosférica e tem como vantagem o rápido processamento; porém, mostra-se menos preciso que alternativas, sendo recomendado para ângulos de visada menores do que 30° e em boas condições atmosféricas, caso contrário, os resultados produzidos são piores devido às incertezas produzidas dentro do método de correção (Proud et al., 2010). Por outro lado, o 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*) é um algoritmo de transferência radiativa que modela as interações atmosféricas com a radiação a partir de um número discreto de camadas homogêneas (Vermote et al., 1997). A técnica apresenta um bom desempenho sobre superfícies homogêneas lambertianas e anisotrópicos, mesmo em altos ângulos de visada (Kotchenova e Vermote, 2007), sendo utilizada no algoritmo de correção atmosférica MODIS (Qu et al., 2014).

Para o cálculo da correção foi utilizado o programa 6SV1, desenvolvido em Fortran, que apresenta resultados precisos para o algoritmo 6S (Roumani, 2015). Porém, o mesmo apresenta complexidade de comunicação para entrada e saída de dados, o que pode ser facilitado com a utilização da biblioteca de interface Py6S (Wilson, 2013). Entretanto, o cálculo pixel a pixel do algoritmo 6S (inserindo a cada pixel as respectivas entradas ângulos de observação e condições atmosféricas e obtendo como saída a reflectância corrigida) resulta em uma correção mais precisa, mas demanda tempo considerável. Contudo, para minimizar o tempo de processamento do 6S foram calculadas, geradas e utilizadas LUTs (*Look-Up Tables*), que são tabelas compostas de valores de entrada de ângulos de observação (ângulo azimutal solar e de visada e ângulo zenital solar e de visada) e condições atmosféricas (vapor de água, ozônio e AOT) e que têm como saída valores de parâmetros de correção atmosférica (Lee et al., 2015). Os

parâmetros de saída são utilizados para calcular a correção atmosférica a partir da radiância das bandas RED e NIR e, em seguida, calcular a reflectância para obter o NDVI MSG com correção atmosférica (Vermote et al., 2006). Os dados de condições atmosféricas foram obtidos pela interpolação dos produtos MOD08 e MYD08 (Hubanks et al., 2015), produto diário que fornece centenas de indicadores de condições atmosféricas e meteorológicas.

4.2.5. Avaliação dos resultados

Cada uma das técnicas propostas (fusão de bandas e correções geométrica e atmosférica) foi validada com o intuito de identificar quais apresentam aumento da correlação estatística com o produto NDVI MOD09, comparada à correlação do NDVI MSG sem uso das técnicas relacionadas. Caso a técnica diminua a correlação entende-se que não seja recomendada a utilização da mesma para obter o NDVI MSG, sendo então descartada. Para tanto, foram selecionados pontos de cada uma das diferentes classes de uso do solo que perfazem grandes áreas (agricultura anual, pecuária e paisagem natural), como feito no primeiro critério da seleção de subintervalo. Os resultados foram apresentados utilizando imagens de composição utilizando cada uma das técnicas e gráficos de dispersão e de séries-temporais de pixels selecionados de cada classe de uso do solo. As técnicas selecionadas foram então aplicadas para obtenção das imagens do NDVI MSG, no período de 2013 a 2015.

4.2.6. Aplicação do NDVI MSG

Para avaliar o potencial do produto NDVI MSG, fez-se um estudo sobre a capacidade de classificação da área de estudo utilizando séries temporais NDVI MSG obtidas no intervalo de dias definido a partir da avaliação de porcentagem de cobertura em diferentes intervalos de dias (etapa 4.2.5), e NDVI MOD13 do período de 2013 a 2015. Para tanto, com o intuito de diminuir o ruído nas imagens, realizou-se os seguintes procedimentos de pré-processamento dos dados (De Almeida et al., 2015): a) filtragem de valores de NDVI com influência de nuvens de subpixel (valores altos e discrepantes em relação ao valor médio de dias próximos) ou obtidos a partir de canal com falha de leitura; b) interpolação de pixels sem informação utilizando dados da série temporal; c) suavização da série temporal utilizando o filtro Savitzky-Golay aplicado em cada um dos pixels (Chen et. al, 2004). Em seguida, fez-se uma média de valores

para cada um dos intervalos de imagens, tendo como resultado imagens MSG e MOD13 que fornecem informações sobre a sazonalidade anual da área de estudo.

Posteriormente, aplicou-se a técnica de Análise de Componentes Principais (PCA, *Principal Component Analysis*), um procedimento matemático que converte um conjunto de observações de variáveis, possivelmente correlacionadas, em um conjunto de valores de variáveis linearmente não correlacionadas, chamadas de componentes principais, mas que representam a variância do dado (ou informação) em poucas imagens. Criada por Pearson (1901), essa técnica é particularmente bem aceita para processamento digital de sinais e sensoriamento remoto ótico (Hirosawa et al., 1996; Gurgel et al., 2003; Almeida et al., 2015). Nesta aplicação serão utilizadas as três primeiras componentes principais, pois, na maioria das aplicações, conseguem representar mais do que 99% da informação de séries temporais (Vaughan e Jones, 2010).

Em seguida, com o intuito de classificar as imagens resultantes, as três componentes foram aplicadas na técnica de classificação não-supervisionada k-médias (*k-mean*). Essa técnica permite classificar a base de dados, em uma determinada quantidade de grupos, agrupando a amostra ao grupo que possuir a menor distância. O processo é repetido até que todos os elementos façam parte de um dos grupos e finaliza devido o número de interações ou quando o erro de classificação é minimizado (Macqueen, 1967). Para tanto, foram consideradas quatro classes que correspondem às três classes de uso do solo mais representativas do mapa TerraClass 2013 (na resolução de 3 km), sendo pastagem (51%), natural (29%) e agricultura anual (17%), e o restante das classes (p.ex. agricultura perene, mineração, urbano) foi considerado na classe nomeada “outros” por ser menos representativo (3%).

O algoritmo de k-médias foi configurado para utilizar uma base de treinamento de 1.000 amostras, número máximo de iterações 10.000 e limiar de convergência de 0,0001. Como o algoritmo k-médias pode gerar resultados distintos, devido à forma que inicializa a organização de classes, foi necessário gerar várias imagens e realizar uma análise visual com o intuito de selecionar a imagem com classificação mais próxima do mapa TerraClass 2013.

Nas imagens selecionadas (MSG e MOD13) foi realizada uma análise com o intuito de identificar como cada uma das classes se compara às classes TerraClass 2013. Com isso, pode-se identificar qual classe TerraClass 2013 (agricultura anual, pastagem, natural e outros) corresponde a cada uma das classes das imagens resultantes (MSG e

MODIS). Posteriormente, fez-se uma análise e discussão comparando os resultados de classificação das imagens resultantes com a classificação TerraClass 2013 utilizando, para isso, matriz de confusão e o índice de concordância Cohen's Kappa, que é utilizado para identificação do acordo de avaliadores em classificações categóricas (Landis e Koch, 1977). Para essas etapas de processamento (PCA e K-médias) utilizaram bibliotecas do software QGIS, um sistema de informação geográfico livre e aberto.

4.3. Resultados

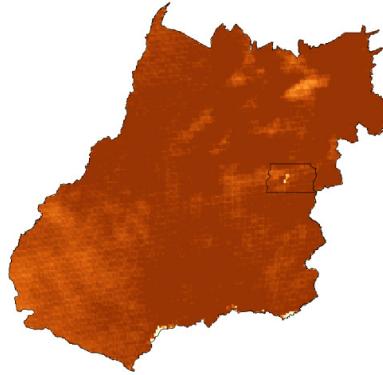
A Tabela 4.1 apresenta a relação de subintervalos de tempo e os resultados dos três critérios, conforme limiares especificados. O principal limitador das opções de subintervalos foi o critério de amostragem mensal. Como resultado, três subintervalos satisfazem todos os critérios, sendo 10:00 h às 12:00 h, 10:30 h às 12:30 h e 10:00 h às 14:00 h. Dentre as alternativas a opção 10:00 h às 12:00 h apresenta menor variação dos ângulos zenithal e azimuthal durante o dia, por ser um intervalo menor com maior iluminação solar, resultando em menor variação do valor do NDVI (Fensholt et al., 2006), sendo, dessa forma, selecionado dentre as opções pertinentes para a obtenção do NDVI MSG.

Tabela 4.1. Resultado dos testes do NDVI MSG de diferentes intervalos do dia considerando critérios de correlação com o NDVI MOD09 ($r > 0,80$), amostragem mensal (dias/mês > 15) e pixel sem leitura (pixels/mês < 30).

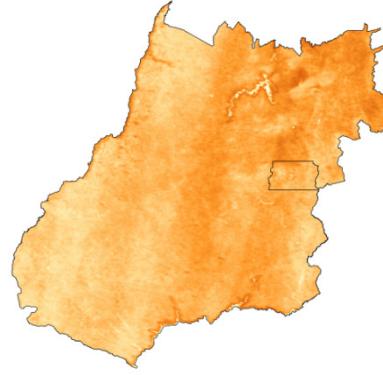
Critérios avaliados	10:00 às 11:00	10:00 às 12:00	10:00 às 14:00	10:30 às 11:30	10:30 às 12:30	11:00 às 12:00	11:00 às 13:00	11:30 às 12:30	11:30 às 13:30	12:00 às 13:00	12:00 às 14:00	12:30 às 13:30	13:00 às 14:00
Correlação com MOD09	x	x	x	x	x	x	x						
Amostragem mensal		x	x		x								
Pixel sem leitura		x	x		x		x		x		x		

Como resultado da análise de resolução temporal dos dados, a Figura 4.3 apresenta a média mensal por pixel para o NDVI MSG (esquerda) e NDVI MOD09 (direita) no período 2013 a 2015, sendo maior quantitativo de amostras para o NDVI MSG (média de 17,7), comparado ao NDVI MOD09 (média de 13,04).

a) NDVI MSG



b) NDVI MOD09

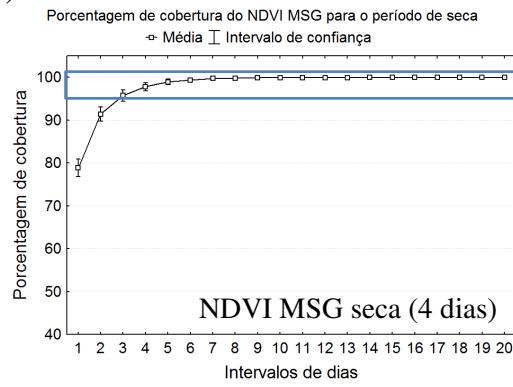


Média mensal de amostras 0 10 12 14 16 18

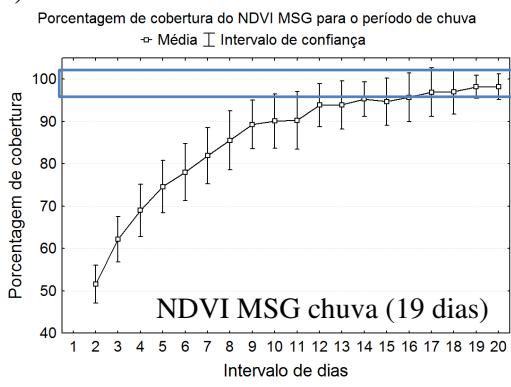
Figura 4.3. Média mensal de amostras para o NDVI MSG (a) e NDVI MOD09 (b) de 2013 a 2015.

A Figura 4.4 apresenta a avaliação da porcentagem de cobertura da área de estudo nos intervalos de 1 a 20 dias para o NDVI MSG para o período de seca (a) e chuva (b), bem como para todo o ano (c) comparado ao NDVI MOD09 (d), no período 2013 a 2015. Os retângulos (em azul) estão sobre a área de alta cobertura (maior do que 95%).

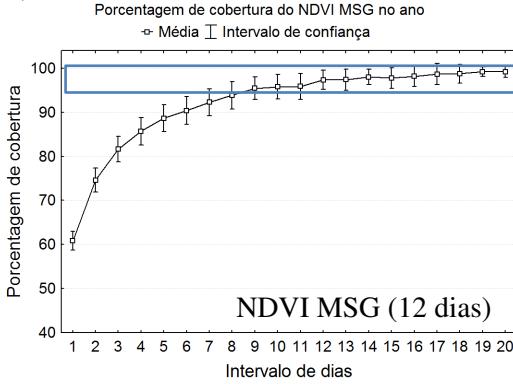
a)



b)



c)



d)

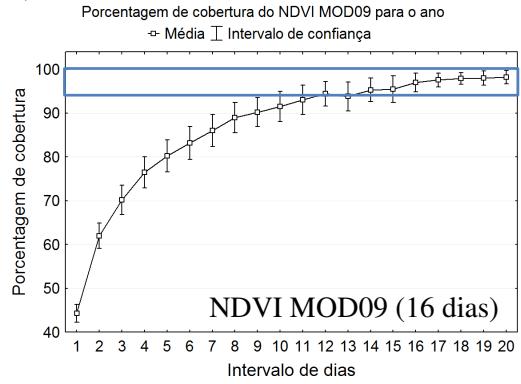


Figura 4.4. Porcentagem de cobertura nos intervalos de 1 a 20 dias para o NDVI MSG no período de seca (a) e chuva (b), bem como para todo o ano (c) comparado ao NDVI MOD09 (d) de 2013 a 2015. Os retângulos (em azul) estão sobre a área de alta cobertura (maior do que 95%).

Observa-se que a alta cobertura para o MOD09 ocorre justamente em 16 dias, que é o intervalo de dias para obtenção do produto MOD13 NDVI, que provém do

MOD09. Dessa forma, para obtenção do NDVI MSG, e com o intuito de permitir uma comparação mais clara com os produtos MODIS, foi escolhido o intervalo de 12 dias, que apresenta alta cobertura, sendo a mesma cobertura encontrada com o produto MOD09, porém em maior tempo.

A limitação de amostras da reflectância da superfície ocorre, para ambos os satélites (MODIS e MSG), principalmente devido presença de nuvens, sendo interessante avaliar as características dos produtos máscara de nuvens. Porém, a máscara de nuvens diária do produto MOD09 tem resolução espacial de 1 km enquanto que a máscara de nuvens do MSG 3 km. Assim, para comparar os produtos, para cada pixel MSG analisou-se a porcentagem de pixels MOD09 com nuvens que estão localizados em mesma área. Foram criadas as seguintes categorias para cobertura de nuvens informada pela banda de qualidade do produto MOD09, relacionado a porcentagem de cobertura de nuvens dentro da área do pixel MSG: muito alto (maior do que 75%), alto (entre 75% e 50%), médio (entre 50% e 25%) e baixo (menor do que 25%). A Figura 4.5 apresenta a porcentagem mensal e média das categorias de cobertura de nuvens da máscara de nuvens do MOD09 para pixels marcados como livres de nuvens (à direita) e com cobertura de nuvens (à esquerda) pela máscara de nuvens do MSG.

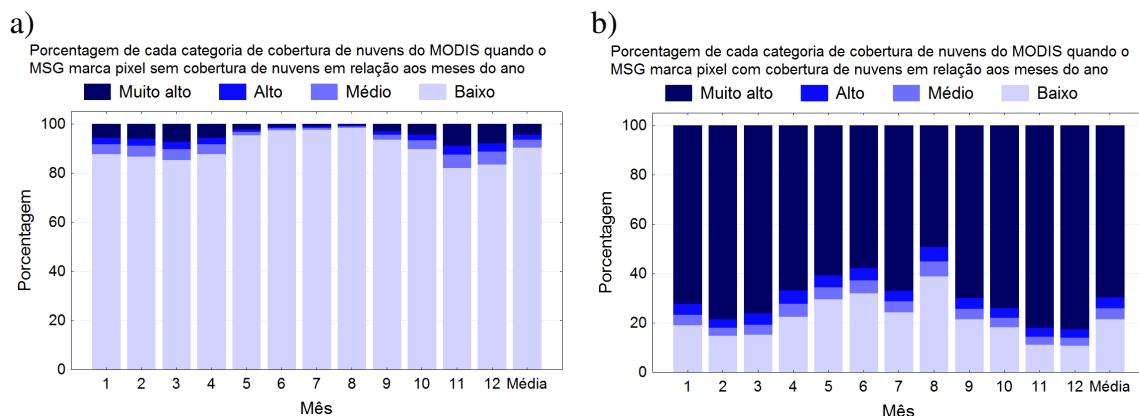


Figura 4.5. Comparação da máscara de nuvens do MSG e MODIS (MOD09) para condições de pixels marcados como sem cobertura de nuvens (à esquerda) e com cobertura de nuvens (à direita) para o MSG.

Para os dados MODIS são considerados os pixels dentro da área do pixel MSG e os valores foram divididos nas seguintes categorias de cobertura de nuvens do produto MODIS: muito alto (maior do que 75%), alto (entre 75% e 50%), médio (entre 50% e 25%) e baixo (menor do que 25%), nos meses e média dos anos de 2013 a 2015 para a área de estudo.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da análise estatística do NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h sem fusão de bandas e com fusão de bandas comparado ao NDVI MOD09 em relação ao total de amostras e às classes de uso do solo avaliadas (agricultura anual, pastagem e paisagem natural). A normalidade dos dados foi confirmada com o teste de Shapiro-Wilk.

Tabela 4.2. Correlação estatística do NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h sem fusão de bandas e com fusão de bandas, utilizando imagens pancromáticas nos intervalos de 14:00 h às 15:00 h e 14:00 h às 16:00 h, comparado ao NDVI MOD09 para o total de amostras e separado para as diferentes classes de uso do solo (agricultura anual, pastagem e paisagem natural).

Dado processado	Total		Agricultura Anual		Pastagem		Paisagem Natural	
	r	n	r	n	r	n	r	n
NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h sem fusão de bandas	0,81	3785	0,88	1047	0,84	1509	0,66	1229
NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h com fusão de imagens pancromáticas de 14:00 h às 15:00 h	0,69	3927	0,80	1139	0,65	1338	0,58	1450
NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h com fusão de imagens pancromáticas de 14:00 h às 16:00 h	0,72	4037	0,81	1193	0,69	1370	0,61	1474

Para realizar a correção atmosférica foi necessário identificar, inicialmente, os intervalos para representação dos valores de cada uma das variáveis de entrada da LUT, conforme as características de observação e condições atmosféricas para a área de estudo no período de 2013 a 2015. Em seguida, foram definidos os intervalos para cada variável e, com essas informações, pode-se então calcular a LUT 6S conforme proposto por Lee et al. (2015). Maiores detalhes sobre particularidades da definição e utilização da LUT 6S podem ser encontrados no Apêndice A.4.

Para avaliar os resultados das correções geométrica (BRDF) e atmosférica (6S) do NDVI MSG optou-se por apresentar a correlação com o produto de reflectância diária MOD09 e o produto de reflectância de 16 dias MOD13 250 m e na resolução espacial de 3 km, sendo para isso o dado reprojetado, utilizando convolução cúbica e reamostragem para 3 km. A Tabela 4.3 apresenta os resultados da análise de correlação estatística do NDVI MSG (sem e com correções) com o NDVI MOD09 (resolução de 500 m) e MOD13 (resoluções de 250 m e 3 km) no período 2013 a 2015.

A Figura 4.6 apresenta séries temporais de um pixel de agricultura anual e pastagem para o NDVI MSG nas diferentes combinações de correção: apenas correção geométrica (NDVI MSG + BRDF) ou geométrica (NDVI MSG + 6S) e as duas correções (NDVI MSG + 6S + BRDF). A normalidade dos dados foi confirmada com o teste de Shapiro-Wilk. Observa-se que o valor de correlação do NDVI MSG sem correção ($r = 0,77$) é menor do que o valor apresentado na tabela anterior, do NDVI MSG 10:00 h às 12:00 h sem fusão de bandas ($r = 0,81$). Isso ocorreu possivelmente devido a menor quantidade de amostras causada pelo algoritmo de correção geométrica que necessita de um número mínimo de amostras no dia sem nuvem ou por falha no processo de inversão numérica (Gao et al., 2002).

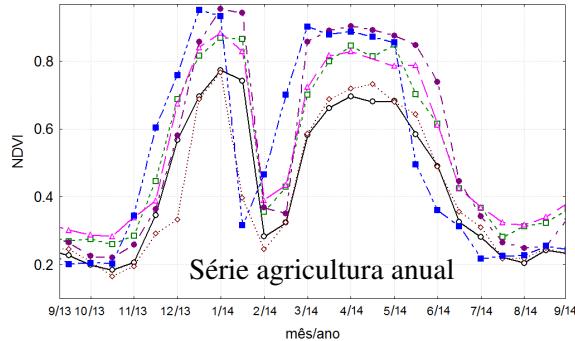
Tabela 4.3. Correlação estatística do NDVI MSG (sem e com correções) com o NDVI MOD09 (resolução de 500 m) e MOD13 (resoluções de 250 m e 3 km) no período de 2013 a 2015.

Dado processado	MOD09		MOD13		MOD13	
	500 m	250 m	3 km	r	n	r
NDVI MSG sem correção	0,77	1456	0,62	1481	0,67	1930
NDVI MSG com correção geométrica BRDF	0,76	1370	0,58	1385	0,64	1808
NDVI MSG com correção atmosférica 6S	0,77	1456	0,62	1481	0,70	1930
NDVI MSG com correção geométrica BRDF e correção atmosférica 6S	0,75	1332	0,59	1346	0,66	1768

Série temporal de área de agricultura anual para o NDVI MSG (com ou sem correções) e o NDVI MOD09 e MOD13 para o período de 09/2013 a 09/2014

—○— NDVI MSG —□— NDVI MSG + 6S —○— NDVI MSG + BRDF

—△— NDVI MSG + 6S + BRDF —●— NDVI MOD09 500 m —■— NDVI MOD13 3 km



Série temporal de área de pastagem para o NDVI MSG (com ou sem correções) e o NDVI MOD09 e MOD13 para o período de 09/2013 a 09/2014

—○— NDVI MSG —□— NDVI MSG + 6S —○— NDVI MSG + BRDF

—△— NDVI MSG + 6S + BRDF —●— NDVI MOD09 500 m —■— NDVI MOD13 3 km

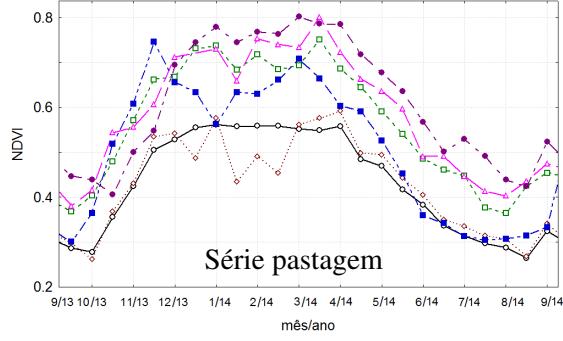


Figura 4.6. Série temporal de agricultura anual (à esquerda), localizado no município de Rio Verde, e pastagem (à direita), localizado no município de Mundo Novo, para o NDVI MSG (com ou sem correções) e o NDVI MOD09 e MOD13, sendo o dado reprojetado, utilizando convolução cúbica, e remostrado para 3 km, para o período 09/2013 a 09/2014. Foram utilizadas as siglas 6S para correção atmosférica e BRDF para correção geométrica.

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de dispersão do NDVI MSG em relação ao NDVI MOD13: (a) sem correção geométrica e atmosférica; (b) com correção geométrica (BRDF); (c) com correção atmosférica (6S); e (d) com correção atmosférica (6S) e geométrica (BRDF). Em cada gráfico foi inserida a reta ($x = y$) para auxiliar na análise de relação entre as variáveis.

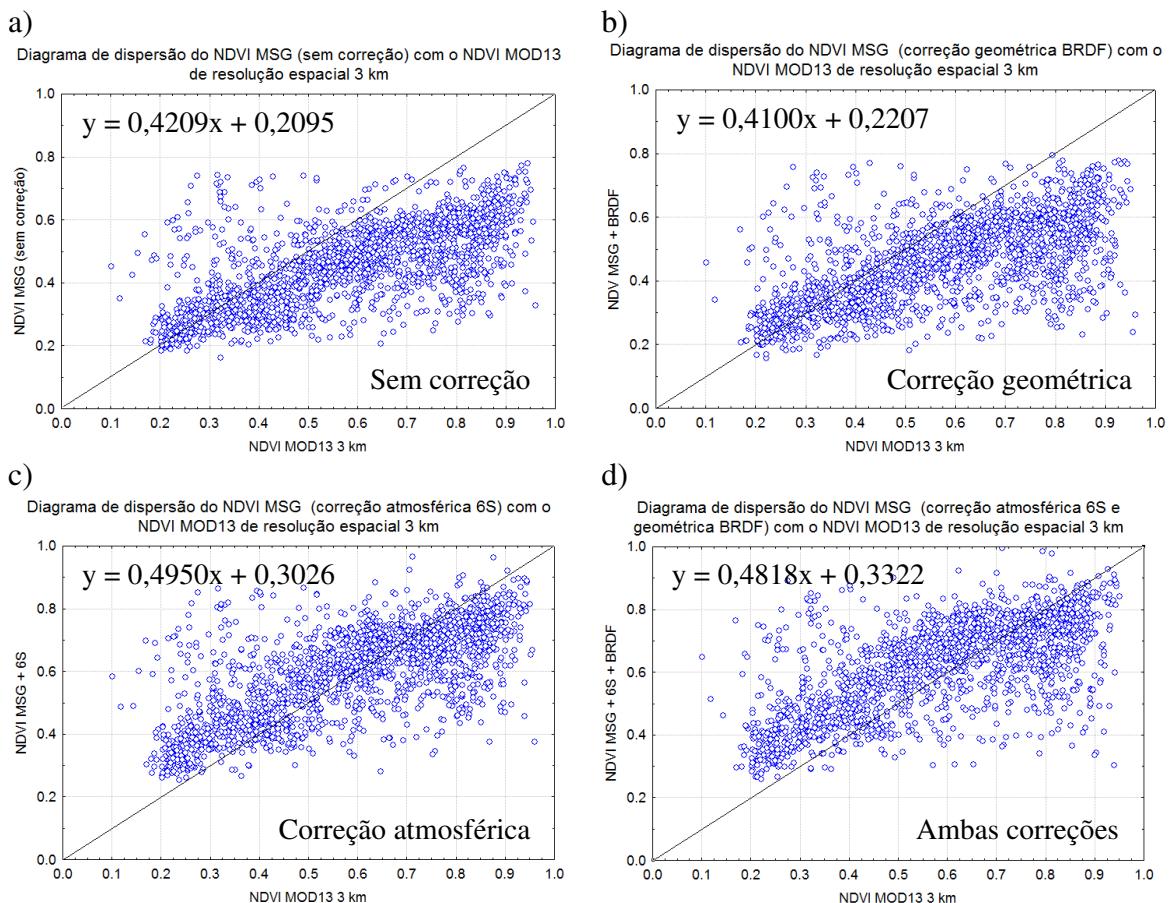


Figura 4.7. Diagrama de dispersão do NDVI MSG em relação ao NDVI MOD13, sendo o dado reprojetado, utilizando convolução cúbica, e remostrado para 3 km, sem correção geométrica e atmosférica (a), com correção geométrica (BRDF) (b), com correção atmosférica (6S) (c) e com correção atmosférica (6S) e geométrica (BRDF) (d) no período 2013 a 2015.

A partir da avaliação de porcentagem de cobertura da área de estudo para o MSG, obteve-se para imagens NDVI MSG com alta cobertura o intervalo de 12 dias (Figura 4.4-c), sendo que para o período de um ano obtém-se 30 imagens NDVI MSG, mais do que o NDVI MOD13 que possui um intervalo de 16 dias e fornece 23 imagens para o mesmo período. Para demonstrar a composição de imagens no intervalo de 12 dias, a Figura 4.8 apresenta o NDVI MSG resultante das técnicas avaliadas, sendo NDVI MSG sem aplicação de técnicas (a) e apenas com fusão de bandas (b), correção geométrica (c) ou correção atmosférica (d).

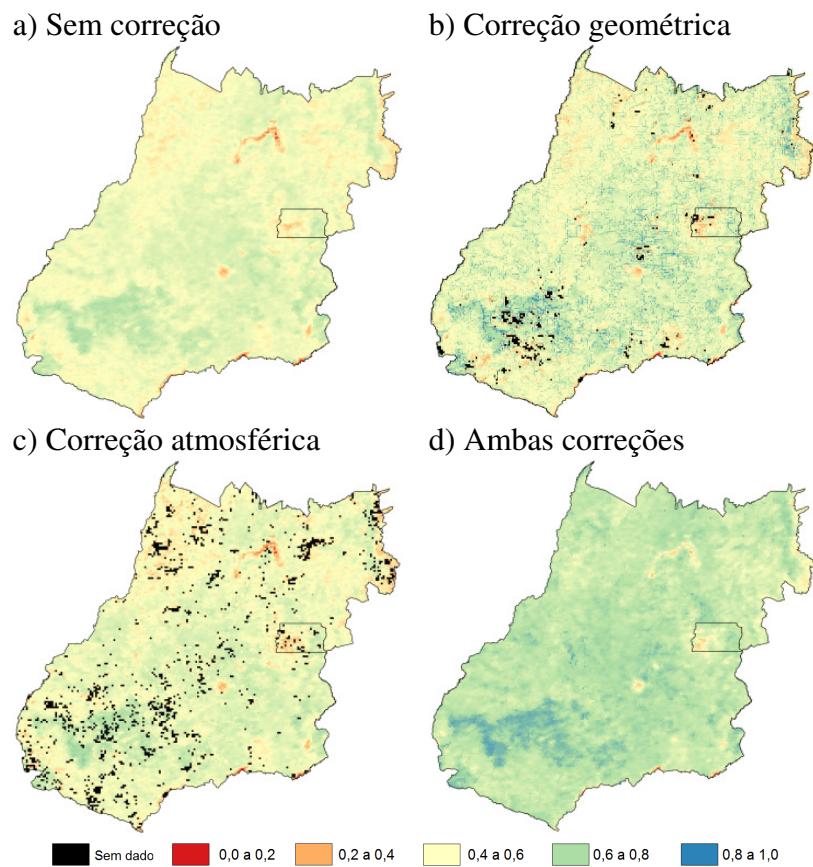
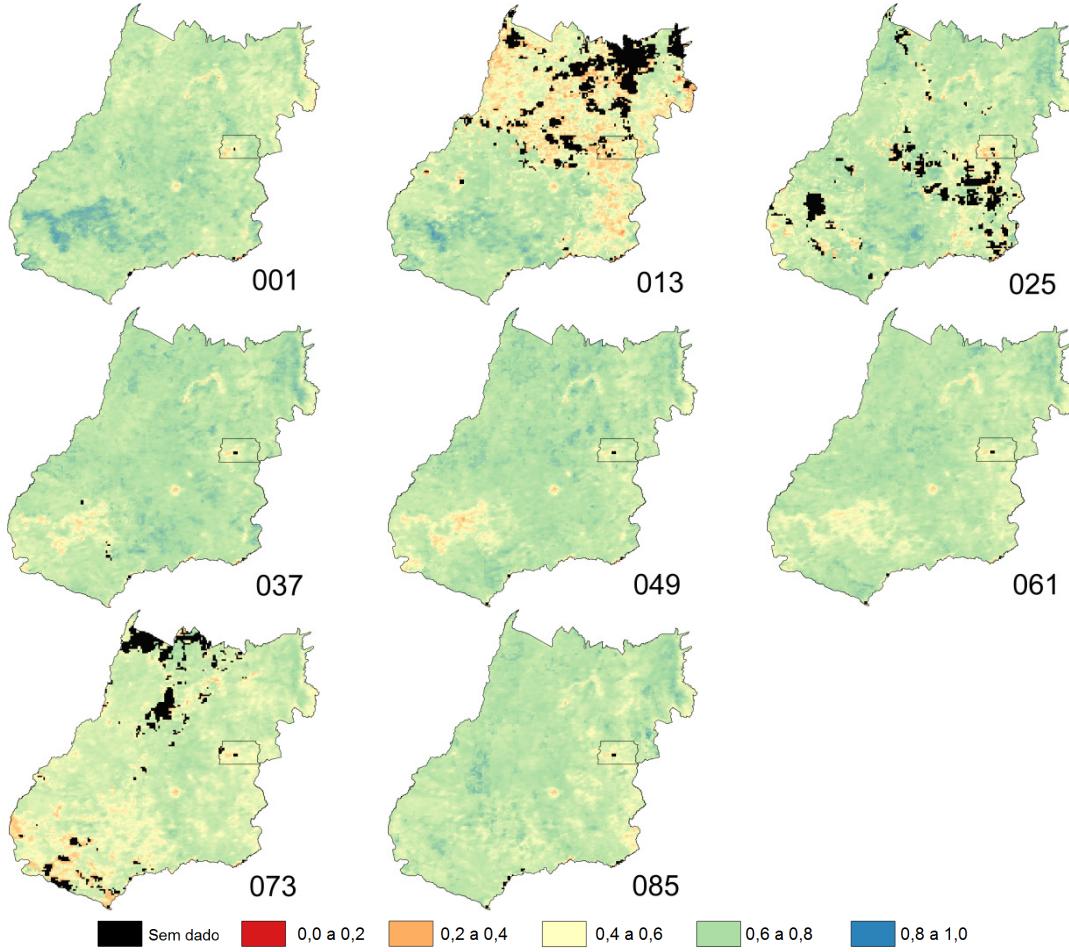


Figura 4.8. Imagens de composição no período de 12 dias (01/01/2013 a 13/01/2013) do NDVI MSG sem aplicação de técnicas (a) e apenas com fusão de bandas (b), correção geométrica (c) ou correção atmosférica (d).

Como parte das análises e o com intuito de avaliar a influência das nuvens sobre as imagens dos produtos NDVI MSG e MOD13, a Figura 4.9 apresenta uma série temporal de meses de estação chuvosa para o ano de 2013. Foram aplicados filtros de nuvens em ambos os produtos, utilizando para o MSG o produto máscara de nuvens e para o MOD13 o *pixel reliability*, considerando, assim, apenas pixels de boa qualidade (Solano et al., 2010). Observa-se a influência das nuvens, onde nas imagens o pixel está sem dado (cor preta).

A aplicação do NDVI MSG tem como intuito avaliar a capacidade de dados geoestacionários para abstração da sazonalidade da superfície do solo. Para tanto, inicialmente, o NDVI MOD13 reprojetado, utilizando convolução cúbica, e remostrado para 3 km, em seguida, as imagens NDVI MSG e NDVI MOD13 foram pré-processadas (realizando filtragem de ruído, interpolação e suavização da série temporal); em seguida, foi calculada a média para cada intervalo, resultando em uma imagem com número de bandas correspondente ao número de intervalos, sendo 30 para o MSG e 23 para o MOD13.

a) NDVI MSG



b) NDVI MOD13 250m

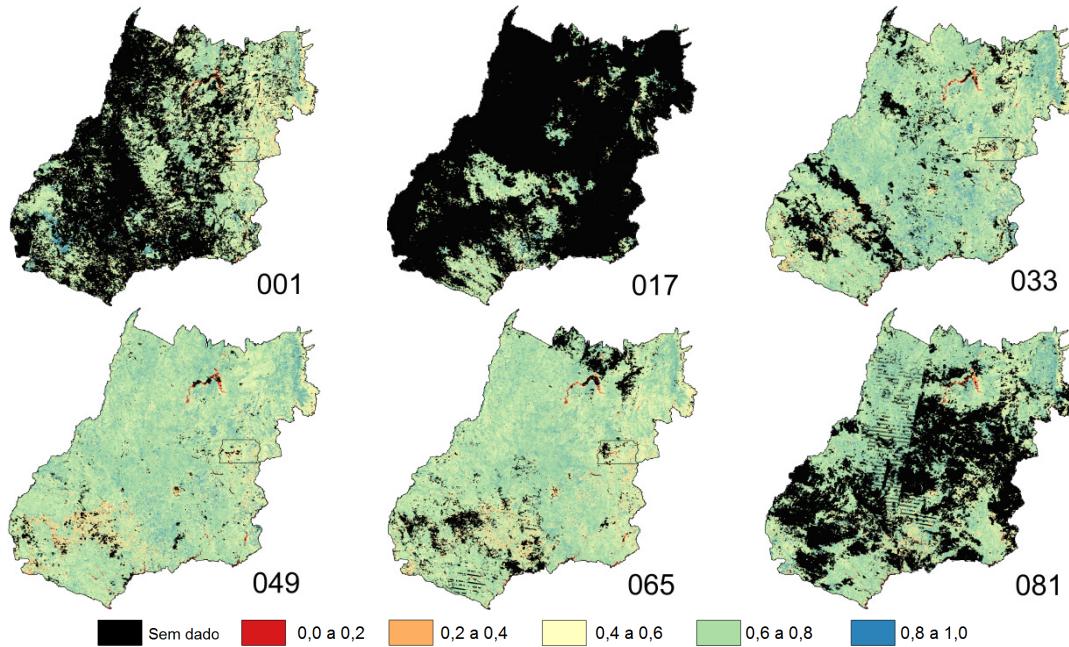


Figura 4.9. Série temporal do NDVI MSG (a) e NDVI MOD13 (b) em intervalos de 12 e 16 dias, respectivamente, em meses de estação chuvosa. O código no canto inferior direito de cada imagem corresponde ao doy (dia do ano) inicial da composição, os dados são do ano de 2013. Foram aplicados filtros de nuvens em ambos os produtos, utilizando o produto máscara de nuvens para o MSG e o pixel reliability, considerando apenas pixels de alta qualidade, para o MODIS.

Posteriormente, realizou-se a operação de componentes principais obtendo as três primeiras componentes que representaram juntas quase toda variância do dado (99,6% para o MSG e 99,1% para o MODIS). A Figura 4.10 apresenta o gráfico da PC1 (primeira componente principal) para o MSG e MODIS, que é a componente mais representativa para ambos os satélites, sendo 98,9% e 97,3%, respectivamente, da variância para o MSG e o MOD13. Já a Figura 4.11 apresenta a imagem das três primeiras componentes para o MSG e MOD13. Detalhes relacionados à média e variância de valores do NDVI MSG e MOD13 são apresentados no Apêndice A.5.

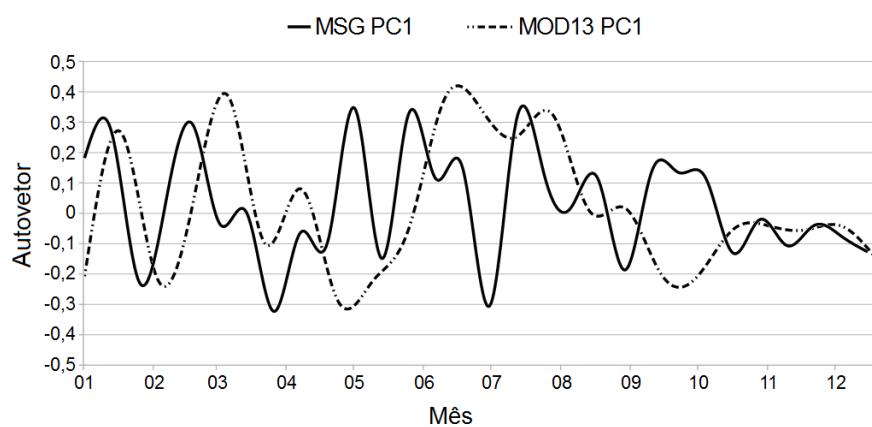


Figura 4.10. Gráfico da primeira componente principal do NDVI MSG e MOD13 durante o ano.

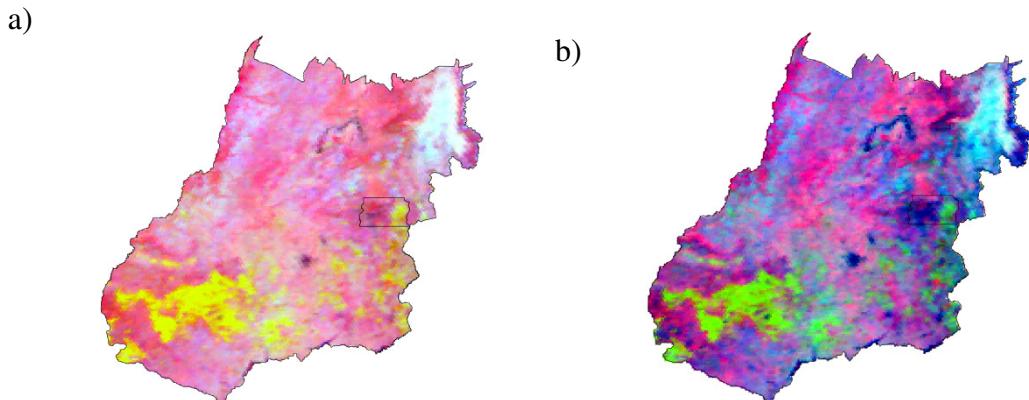


Figura 4.11. Imagem das três primeiras componentes principais para o MSG (a) e MOD13 (b) sendo representadas em três bandas PC1 (cor vermelho), PC2 (cor verde) e PC3 (cor azul).

Em seguida, com intuito de identificar qual classe resultante do algoritmo k-médias está relacionada com qual classe de uso do solo, fez-se a análise comparativa da proporção das classes das imagens resultantes da técnica de k-médias (MSG e MOD13) com as principais classes de uso do solo TerraClass 2013 (pastagem, natural, agricultura anual e outros). Para tanto, o mapa foi reamostrado para o valor mais frequente da área do pixel MSG, sendo reprojetado e reamostrado para 3 km.

A Figura 4.12 apresenta a distribuição dos pixels da área de estudo, em porcentagem das classes TerraClass 2013, dado as classes obtidas com o algoritmo k-médias para as três primeiras componentes principais do MSG e MODIS. Observa-se que as classes das imagens MSG (a) e MODIS (b) representam, em maior proporção, cada uma das três principais classes TerraClass 2013. Sendo, para o MSG, as classes 2, 0 e 3 para pastagem, natural e agricultura anual, respectivamente, e para o MOD13, as classes 0, 2 e 1 para pastagem, natural e agricultura anual, respectivamente. A classe restante foi utilizada para representar a classe “outros”, sendo a classe 1 do MSG e a classe 3 do MOD13. Observa-se que “outros” apresenta alta porcentagem dentro da classe 0 do MOD13, no entanto, a classe 0 foi escolhida para representar a pastagem, por ser a classe que tem maior representatividade sobre a área de estudo. Com as classes identificadas pode-se então fazer uma análise comparativa da classificação utilizando, para isso, análise de matrizes de confusão e o índice de concordância Kappa, conforme apresentado na Figura 4.13.

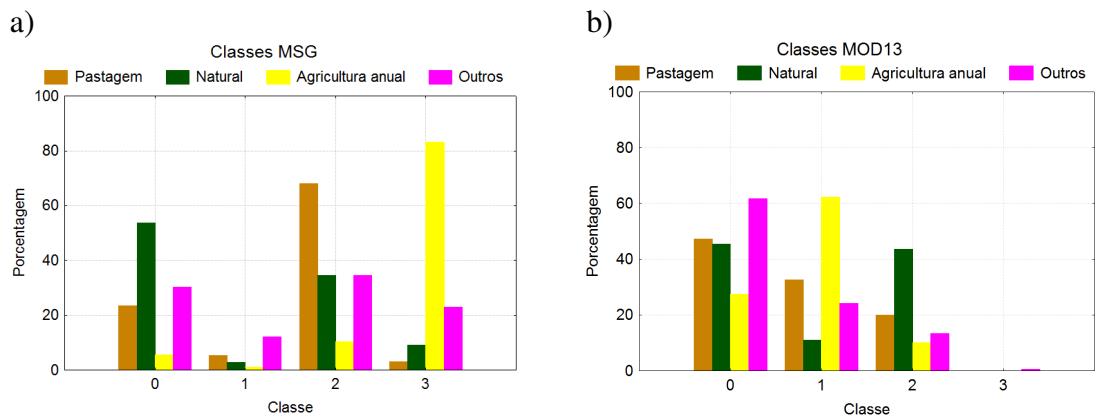


Figura 4.12. Distribuição dos pixels da área de estudo, em porcentagem das classes TerraClass 2013, dado as classes obtidas com k-médias para as três primeiras componentes principais do MSG (a) e MODIS (b). Sendo 100% o total de pixels de cada classe.

a)		b)		c)	
Pastagem	MSG	Pastagem	MOD13	Pastagem	MSG
TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo
positivo	35% 16%	positivo	24% 27%	positivo	23% 21%
negativo	13% 26%	negativo	20% 29%	negativo	25% 31%
	$k = 0,35$		$k = 0,06$		$k = 0,08$
Natural	MSG	Natural	MOD13	Natural	MSG
TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo
positivo	15% 13%	positivo	12% 16%	positivo	12% 13%
negativo	14% 58%	negativo	12% 59%	negativo	17% 58%
	$k = 0,34$		$k = 0,27$		$k = 0,24$
Agricultura anual	MSG	Agricultura anual	MOD13	Agricultura anual	MSG
TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo
positivo	14% 3%	positivo	11% 6%	positivo	10% 21%
negativo	5% 78%	negativo	21% 62%	negativo	9% 60%
	$k = 0,73$		$k = 0,29$		$k = 0,22$
Outros	MSG	Outros	MOD13	Outros	MSG
TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo	TerraClass	positivo negativo
positivo	0% 3%	positivo	0% 3%	positivo	0% 0%
negativo	4% 93%	negativo	0% 97%	negativo	29% 71%
	$k = -0,04$		$k = 0,00$		$k = 0,00$
Total	$k = 0,40$	Total	$k = 0,16$	Total	$k = 0,16$

Figura 4.13. Matrizes de correlação das principais classes TerraClass 2013 com MSG (a), MODIS (b) e entre MODIS e MSG (c), organizado em colunas. Sendo 100% o total de pixels para a área de estudo.

Para uma análise visual dos resultados de classificação colocaram-se os mapas TerraClass 2013, e o resultado da classificação não-supervisionada com o MSG e MOD13 em mesma paleta de cores e resolução espacial de 3 km, representando as quatro classes de uso do solo, conforme apresentado na Figura 4.14.

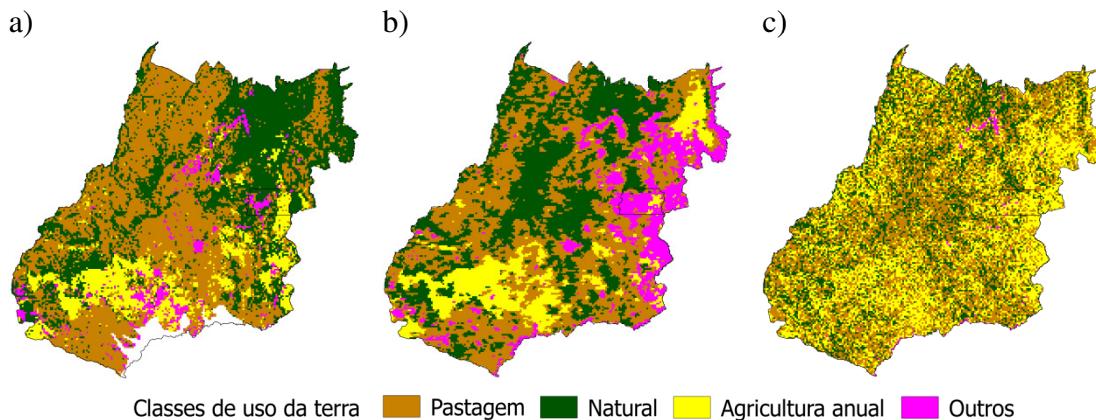


Figura 4.14. Mapa das principais classes de uso do solo da área de estudo TerraClass 2013 reprojetado e reamostragem para 3 km (a) e resultados obtidos a partir de processamento das técnicas de componentes principais e k-médias com dados MSG (b) e MOD13 (c), para o período 2013 a 2015.

4.4. Discussão

Foi selecionado o subintervalo de 10:00 h às 12:00 h hora local para obtenção do NDVI MSG, conforme análise de critérios de qualidade (Tabela 4.1), sendo este utilizado para as demais análises. Na avaliação da média mensal de amostras para o ano

todo se observa que em quase toda área de estudo ocorre uma média consideravelmente maior para o NDVI MSG, comparado ao NDVI MOD09 (Figura 4.3), sendo menor para o oeste da área de estudo. Ao avaliar os intervalos de dias para obtenção de uma imagem de alta cobertura (intervalo de confiança acima de 95%) o MSG demonstrou maior resolução temporal (12 dias) comparado ao MOD09 (16 dias) (Figura 4.4-c, d). Na prática o produto MOD09 em um período de 16 dias, pode obter até 16 observações; no entanto, devido a alta cobertura de nuvens no momento em que o sensor do satélite polar realiza a leitura (média global de 50 a 60%), a média de amostras torna-se bem pequena (Solano et al., 2010). Nesse sentido, o intervalo de oito dias apresenta resultados pertinentes para o monitoramento da superfície com dados MSG em âmbito global (Sobrino et al., 2013), porém, para uma maior cobertura sobre a área de estudo é recomendado um intervalo maior, como no caso do continente Africano, em que estudos consideram 10 dias como um intervalo satisfatório (Fensholt et al., 2006).

As curvas do intervalo de dias apresentam um padrão de crescimento logarítmico; aumentando conforme o aumento dos dias de intervalo, chegando a um patamar que aumenta pouco com o aumento do intervalo. Isso ocorre devido a reincidência de nuvens em uma mesma área durante alguns dias, que não permite aumentar consideravelmente a cobertura sobre a área de estudo mesmo com o aumento do intervalo de dias, e ocorre principalmente em regiões com alta pluviosidade no período estação chuvosa (Ali et al., 2013). Particularmente, a curva do MSG cresce mais rápido do que a curva do MOD09, chegando a um patamar de 90% de cobertura em apenas oito dias, enquanto o MOD09 chega a esse patamar em 12 dias.

Devido às características de alta resolução temporal do MSG esperava-se um intervalo menor de tempo para obtenção de uma imagem sobre a área de estudo (maior do que 95% de cobertura), no entanto, observando separadamente a cobertura para os períodos de estações de seca (Figura 4.4-a) e chuvosa (Figura 4.4-b) percebe-se que no período de seca o intervalo é realmente pequeno (quatro dias), no entanto, no período de estação chuvosa o intervalo é bem maior (19 dias). Essa diferença fica mais compreensível na análise das características da máscara de nuvens do MSG, comparado à máscara de nuvens do produto MOD09 (Figura 4.5). Quando a máscara de nuvens do MSG marca o pixel como livre de nuvens a máscara de nuvens do MOD09 apresenta uma alta média mensal com baixa quantidade de nuvens (maior do que 90%), variando conforme a sazonalidade, sendo menor para os meses de seca (meses 4-9). De modo

geral, o erro quando a máscara de nuvens do MSG marca livre de nuvem e a máscara do MOD09 considera alta quantidade de nuvens, é pequeno (menor do que 5%).

Entretanto, quando o pixel MSG apresenta cobertura de nuvem, o MOD09 apresenta uma média mensal considerável com baixa cobertura de nuvem (21%). Isso varia conforme a sazonalidade, sendo maior nos períodos de seca (meses 4-9) devido a maior presença de aerossóis neste período que influencia diretamente o canal RED e ocasiona maior quantidade de detecção de nuvem onde está livre de nuvem (Hocking et al., 2011). Mas esse erro não está relacionado apenas à presença de aerossol, gerado, por exemplo, devido queimadas no período de seca (meses 4-9), já que durante esse período não ocorre um aumento gradativo (ou proporcional) dos erros de comissão. Por exemplo, ocorre aumento em um mês (8), no entanto, queda de erro no mês subsequente (9). Além disso, nesse período, há também um menor quantitativo de pixels que apresenta nuvens, comparado com os meses do período chuvoso (meses 1-3 e 10-12).

De fato, esse erro ocorre principalmente pelo alto ângulo de visada, pois algumas combinações de geometria de visualização e iluminação resultam em uma informação menos confiável como um indicador da nuvem, gerando erro de comissão, como observado em resultados semelhantes aos encontrados com o MSG em outras áreas de alto ângulo de visada (Proud et al., 2014). Consequentemente, a definição de um menor intervalo de dias para obtenção do NDVI MSG com alta cobertura sobre a área de estudo é prejudicada devido erros de comissão do algoritmo de detecção de nuvens (em média 21%).

O algoritmo de máscara de nuvens do MSG realiza o cálculo de diferença espectral usando várias combinações de canais e compara as diferenças medidas com as diferenças simuladas de céu claro. As diferenças simuladas são produzidas usando como entrada perfis do modelo NWP (*Numerical Weather Prediction*) para um modelo de transferência radiativa rápida (Derrien and Le Gléau, 2005). Porém, existem estudos que propõem novos algoritmo de máscara de nuvens, que poderiam ser avaliados, como a máscara SAFNWC (*Nowcasting Satellite Applications Facility*) que emprega tabelas de pesquisa pré-calculadas derivadas de grandes números de simulações de transferência radiativa em uma ampla gama de modelos perfis (Hocking et al., 2011) ou metodologias estatísticas aplicadas sobre as bandas multiespectrais, que apresentam bom desempenho especialmente na detecção em terra (Amato et al., 2008). Por outro lado, técnicas atuais exploram a utilização de Redes Neurais MLP (*MultiLayer Perceptron*) como feito por Tavarat et al. (2015), que obteve uma melhoria (2,9%) de classificação de nuvens, ou

incluir a banda pancromática no algoritmo para detecção de nuvens, permitindo a detecção de nuvens em menor resolução espacial do que as bandas multiespectrais, as nuvens de subpixel (Bley e Deneke, 2013).

Ao analisar as técnicas avaliadas, de modo geral, a fusão de bandas diminuiu a correlação entre o NDVI MSG e NDVI MOD09, independente do intervalo para obtenção das imagens pancromáticas (Tabela 4.2), logo, a fusão de bandas mostra-se não recomendada para obtenção do NDVI MSG. Isso ocorre, principalmente, devido ao alto ângulo de visada do MSG para a área de estudo que acarreta no aumento da área de visada instantânea do sensor (*GIFOV*, *Ground Instantaneous Field Of View*), sendo essa área maior do que a área de um pixel, acarretando na sobreposição de pixels, em que um pixel possui além da informação da sua área, informação de pixels vizinhos (Jones e Vaughan, 2010; Cracknell, 1998).

A avaliação das técnicas de correção geométrica e atmosférica demonstra que a correção atmosférica mantém ou aumenta a correlação do NDVI MSG comparado ao NDVI MOD09 ou MOD13 (Tabela 4.3) diferente da correção geométrica que diminui correlação entre os dados. Da mesma forma, observando as séries temporais (Figura 4.6) os valores do NDVI MOD13 e MOD09 são relativamente maiores do que o NDVI MSG sem correção. No entanto, essa diferença é menor para o NDVI MSG com correção atmosférica (NDVI MSG + 6S) tornado os valores mais próximos ao NDVI MOD13 3 km, independente da classe de uso do solo, fornecendo resultados equivalentes tanto para agricultura anual quanto para pastagem. Como visto nas séries temporais de agricultura anual e pastagem (Figura 4.6), o NDVI MSG sem correção atmosférica apresenta, em altos ângulos de visada, uma compressão da amplitude do NDVI, causada pelo aumento do caminho ótico, sendo a correção atmosférica, mesmo com menor precisão nessas condições, recomendada para melhoria da qualidade do índice (Sobrino et al., 2013).

Já a correção geométrica sobre os dados (NDVI MSG + BRDF e NDVI MSG + 6S + BRDF) proporcionou um ajuste fino dos valores de origem (respectivamente NDVI MSG e NDVI MSG + 6S), porém não gerou uma alteração relevante na série temporal original. No diagrama de dispersão confirmam-se esses resultados (Figura 4.7), em que na correção atmosférica as amostras do NDVI MSG (sem correção e com correção geométrica) se aproximam mais da reta que corta os gráficos, demonstrando que esse procedimento pode melhorar a correlação dos dados do NDVI MSG com o NDVI MOD13. O menor coeficiente de correlação após aplicar a correção geométrica

pode ter ocorrido devido ao alto ângulo de visada do MSG para a área de estudo que proporciona maior variação do valor do NDVI durante o dia, o que diretamente influencia na precisão das estimativas dos núcleos geométrico e volumétrico. Além disso, como o MSG é geoestacionário, o ângulo de visada é o mesmo para qualquer amostra do dia, sendo considerado um valor constante para cada pixel. Logo, não se observa a área do pixel em diferentes ângulos de visada, não cumprindo um requisito de qualidade dos métodos de correção geométrica (Beisl, 2001) e que poderia agregar informações para o processo de inversão numérica e, assim, melhorar os resultados da correção geométrica (Fensholt et al., 2006).

Em uma análise visual de imagens de composição do NDVI MSG para as técnicas avaliadas observa-se que a correção atmosférica (Figura 4.8-d) aumenta consideravelmente os valores do NDVI da imagem original, obtida a partir das reflectâncias do RED e NIR sem nenhuma correção (Figura 4.8-a). Por outro lado, a correção geométrica (Figura 4.8-c) relativamente não modifica o valor do NDVI, além de apresentar grande quantidade de pixels sem dado devido falha no processo de inversão numérica. A falha de inversão pode chegar até um terço (25%) dos cálculos de correção geométrica para esta área de estudo, e ocorrem principalmente devido a reflectância da banda RED (16%) porque a banda RED apresenta maior influência de variação dos ângulos de iluminação e observação das amostras, em seguida de falha nas duas bandas RED e NIR (8%), e bem menos devido apenas a banda NIR (1%) (Silveira et al., 2017). Da mesma forma, a fusão de bandas (Figura 4.8-b) quando comparada à imagem original apresenta diferenças consideráveis, como o aumento ou diminuição do valor do NDVI em diferentes áreas, fatores que possivelmente ocasionaram diminuição de correlação observada (Tabela 4.2), além de apresentar alguns pixels sem dado devido cobertura de nuvens das imagens pancromáticas.

Dessa forma, apenas a correção atmosférica foi utilizada para obtenção do NDVI MSG de composição de 12 dias. Para conhecer melhor a influência das nuvens sobre o produto fez-se uma série temporal de imagens do NDVI MSG e MOD13 (Figura 4.9) em meses de estação chuvosa. Observa-se que o produto MOD13 tem maior ausência de dados do que o MSG, principalmente nas duas primeiras imagens (Figura 4.9-b, dos 001 e 017). Especificamente na região sudoeste, onde há predominância de uso do solo para agricultura anual, ocorre cobertura de nuvens em maior parte do período avaliado (Figura 4.9-b, excluindo doy 049), dificultando o monitoramento com o NDVI MOD13, diferente do MSG, que apresentou maior influência de nuvens em apenas uma imagem

(Figura 4.9-a, doy 025). Assim, com a maior cobertura de dados do NDVI MSG sobre áreas de agricultura é possível realizar o monitoramento dos cultivos permitindo a identificação das fases de desenvolvimento do cultivo, como feito por Sobrino et al. (2013) que utilizaram imagens do NDVI MSG no intervalo de oito dias para identificar as fases de crescimento e senescência, tendo como área de estudo toda área de cobertura do MSG. Porém, erros de omissão da máscara de nuvens do MSG são percebidos em apenas uma das imagens (Figura 4.9-a doy 013). Nesta imagem grande parte da região norte e leste apresentam um valor de NDVI bem abaixo do que pode ser visto nas composições em datas anterior (doy 001) e posterior (doy 025). Como visto na comparação com a detecção de nuvens do produto MODIS (Figura 4.5-a), esse erro ocorre mais nos meses de estação chuvosa. Dessa forma, mesmo com uso de máscara de nuvens, é importante avaliar o desvio em relação aos valores anterior e posterior para que esse erro não seja incorporado à série temporal. Uma alternativa seria inserir no algoritmo de seleção do NDVI diário o critério de desconsiderar valores de NDVI que apresentem uma variação maior do que 15% em relação ao medido no dia anterior, por possivelmente se tratar de influência de cobertura de nuvens de subpixel (Proud et al., 2014).

Na análise de componentes principais para identificar a capacidade de abstração da sazonalidade os valores absolutos e maiores dos autovetores, que corresponde aos picos positivos e negativos presentes no gráfico (Figura 4.10) representam as imagens que possuem variações sazonais mais relevantes para o cálculo da PC1. Ao se considerar valores absolutos maiores do que 0,1 como mais influentes para obtenção da componente principal, a PC1 do MSG faz uso de maior quantidade de imagens (21), comparando a PC1 do MOD13 (14). Esse resultado se mostra relevante ao considerar que a área de estudo possui em maior proporção, áreas de pastagem e agricultura anual (67%), e que são classes de uso do solo que sofrem, principalmente, influências sazonais antrópicas, como períodos de preparação do solo, cultivo e colheita para a agricultura anual e utilização de rotação de gado e técnicas de manejo na pastagem. Essa antropização proporciona variações de NDVI distintas a áreas que sofrem apenas influências sazonais climáticas, como apresentado para o bioma Pantanal (De Almeida et al., 2015). Dessa forma, com a maior resolução temporal proporcionada por satélites geoestacionários, consegue-se, através da PCA, abstrair mais informação dessa variação sazonal anual, melhorando assim a qualidade do monitoramento da superfície do solo.

Analizando o comportamento das componentes principais durante o ano (Figura 4.10), percebem-se padrões similares de janeiro ao início de maio, no entanto, ocorre atraso do MOD13 em relação ao MSG. Possivelmente, isso ocorre devido a maior resolução temporal da composição do MSG, comparado ao MOD13, que acarreta em menor intervalo entre as imagens, permitindo a detecção mais rápida de mudanças da superfície do solo. Também nesses meses, na superfície do solo, ocorrem sequencialmente as fases de alto vigor da vegetação (janeiro a março) e senescência da agricultura de primeira fase (março a abril para a PC1 MSG e março a maio para a PC1 MOD13), cujo plantio iniciou de outubro a dezembro do ano anterior. Logo após, ocorre a fase de plantio da agricultura de segunda fase (meados de abril para a PC1 MSG e início de maio para a PC1 MOD13), antes conhecida como “safrinha”. Essas fases são representativas para a PCA dos produtos, apresentando autovetores com valor sem sinal (módulo) alto (maior do que 0,2). Já de maio ao final de setembro, que corresponde ao período da seca, o MSG se diferencia muito do MOD13, apresentando maior quantidade de picos positivos e negativos de autovetores como oscilações rápidas de picos positivo-negativo-positivo, característica que não ocorre em análises PCA em regiões de pouca influência antrópica, como avaliado para o bioma Pantanal (De Almeida et al., 2015). Nos meses de outubro a dezembro percebe-se que os valores dos autovetores são pequenos, para ambos os produtos, demonstrando que a sazonalidade nesse período influencia pouco no cálculo da componente principal. Em outubro, ocorre o início da estação chuvosa, porém, devido ao atraso de resposta do NDVI, o efeito ainda não pode ser percebido na superfície do solo e, consequentemente, não sendo relevante para as componentes principais. Da mesma forma, nos meses de outubro a dezembro ocorre o início do plantio de agricultura de primeira fase, principalmente soja e milho, que apresentam maior vigor da vegetação somente nos meses de janeiro a março do próximo ano.

O resultado visual da técnica PCA para o MSG e MOD13 (Figura 4.11) comparado com o Mapa TerraClass 2013 (Figura 4.13-a) permite identificar áreas com grandes padrões similares, como no sudoeste goiano e nos limites a leste do estado (no MSG em amarelo e no MOD13 em verde), que corresponde a áreas de agricultura, e no nordeste do estado que apresenta um padrão diferenciado (no MSG em branco-acinzentado e no MOD13 em azul claro) e que corresponde principalmente a áreas de pastagem, e que se diferenciam por ser uma área com alta produtividade primária, principalmente, devido o maior investimento dos produtores pela proximidade com

frigorífico e tipo de solo predominante (argisolo) (Garcia, 2012). Assim, as imagens em si apresentam similaridades, no entanto, são distintas nos intervalos de valores das banda utilizadas para representação dos padrões da PCA, o que influencia diretamente nos resultados da análise de classificação não-supervisionada.

Ao analisar os resultados do algoritmo de classificação não-supervisionada k-médias (Figura 4.12) o MSG proporciona uma melhor classificação entre as principais classes TerraClass 2013 (68% de pastagem, 53% de natural e 83% de agricultura anual) comparado ao produto MOD13 (50% de pastagem, 46% de natural e 72% de agricultura anual). Ao comparar as matrizes de confusão (considerando a área de estudo como 100 %), os resultados positivo-positivo são mais elevados para o MSG (35% em pastagem, 15% em vegetação natural e 14% em agricultura anual), do que para o MODIS (24% em pastagem, 12% em vegetação natural e 11% em agricultura anual). Os níveis de concordância são para o MSG substancial para agricultura anual ($K = 0,73$) e considerável para pastagem ($K = 0,35$) e natural ($K = 0,34$), diferente do MODIS que apresenta um nível de concordância considerável para agricultura anual ($K = 0,29$) e natural ($K = 0,32$) e ligeira para pastagem ($K = 0,06$). Observam-se melhores resultados com a classe de agricultura anual, comparado às outras classes avaliadas, isso está relacionado à sazonalidade anual de dois ciclos de agricultura, primeira fase e segunda fase (Figura 4.6-a), e que se distingue da sazonalidade da pastagem (Figura 4.6-b) e vegetação natural. Essa diferença mostra-se perceptível nas imagens das componentes principais (Figura 4.9) que permitem distinguir a região sudoeste do estado de Goiás, o qual apresenta predominância de agricultura anual.

Nesta análise, esperava-se um resultado melhor para o MODIS, devido a sua menor resolução espacial comparada ao MSG. No entanto, ao se comparar com estudos relacionados de uso de técnicas não-supervisionadas para classificação de uso do solo (De Almeida et al., 2015) os estudos costumam utilizar grandes séries temporais (20 – 30 anos) e neste estudo foi considerada uma série temporal pequena (3 anos), o que pode ter influenciado os resultados. Porém, é necessário considerar que o produto NDVI MOD13, quando filtrado as influências de nuvens, apresenta menor cobertura sobre a área de estudo do que o produto NDVI MSG, como pode ser visto em imagens dos meses estação chuvosa, no ano de 2013 (Figura 4.9). Destaca-se que esse método de classificação automática não representa os métodos de classificação mais utilizados ultimamente e que poderiam gerar mapas de uso do solo mais precisos com o MODIS. Tais resultados demonstram a capacidade de classificação não-supervisionada de séries

temporais do MSG e, de certa forma, o potencial de dados de satélites geoestacionários para o monitoramento da superfície, ao fornecer dados em menores intervalos de tempo, quando comparado a satélites de órbita polar, mesmo quando se utiliza séries temporais curtas.

Na avaliação visual dos mapas observam-se grandes padrões de classes de uso do solo nas imagens TerraClass 2013 (Figura 4.14-a) e que podem ser vistas no MSG (Figura 4.14-b), mas que não podem ser vistas com os resultados do MOD13 (Figura 4.14-c), como áreas de agricultura anual e pastagem no sudoeste, pastagem no noroeste e vegetação natural no centro-norte. Da mesma forma, as grandes áreas de pastagem e natural do norte goiano são vistas no MSG, porém, ao comparar com o TerraClass 2013 percebe-se que ocorrem erros de comissão e omissão entre as duas classes, identificando pastagem onde é natural e vice-versa. Entretanto, de certa forma, esse erro é comum na classificação não-supervisionada, principalmente devido as características de cobertura do solo nessa área, em que a paisagem natural é predominantemente de formações savânicas, o qual possuem padrões sazonais similares à pastagem. A classe “outros” do MSG consegue incluir várias classes do mapa TerraClass 2013 como áreas urbanas, corpos d’água, silvicultura, não observada. Porém, inclui também outras áreas como áreas da fronteira a nordeste do estado de Goiás, possivelmente por apresentarem um padrão sazonal distinto das demais classes (agricultura, pastagem e natural).

4.5. Conclusão

Os índices de vegetação obtidos em condições de altos ângulos de visada necessitam de ajustes para diminuir a influência das condições geométricas e atmosféricas, apresentando menor qualidade, sendo por isso não recomendado para ser utilizado sem as devidas correções. Este artigo teve como objetivo avaliar a obtenção do NDVI MSG com qualidade, em altos ângulos de visada, tendo como área de estudo o estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal, no período 2013 a 2015. O intervalo durante o dia que apresentou melhor resultado foi o das 10:00 h às 12:00 h, conforme critérios quantitativos relacionados à correlação com o NDVI MOD09, média mensal de amostras/mês e média mensal de pixels/mês sem valor.

Em uma análise comparativa, o NDVI MSG mostrou-se capaz de obter imagens sobre o estado de Goiás com alta cobertura de pixels (95%) no intervalo de 12 dias, enquanto o MOD09 obtém no intervalo de 16 dias. Porém, a máscara de nuvens do MSG, comparada à máscara de nuvens do produto MOD09, acerta mais quando marca

pixel como livre de nuvens (90%) do que quando marca o pixel como nuvem (70%) sendo, neste caso, relevante a porcentagem de erro do pixel MSG onde os pixels MOD09 marcam a área como livre de nuvem (21%). Assim, a oportunidade de se ter uma imagem com alta cobertura em menor intervalo de dias é prejudicada devido erros de comissão de presença de nuvens pelo produto máscara de nuvens. De qualquer forma, a maior resolução temporal permite obter maior amostragem para análises de séries-temporais, agregando mais informação às análises.

O uso da banda pancromática não apresentou aumento da correlação com dados MODIS, não agregando melhorias aos resultados, mesmo sendo avaliados diferentes intervalos de horários para composição da imagem pancromática. A correção geométrica é um ajuste fino que, nestas análises, não apresentou aumento da correlação dos dados. Por outro lado a correção atmosférica mantém a correlação dos dados e aumenta o valor do NDVI, aproximando mais o valor do NDVI MSG dos produtos NDVI MODIS.

Ao realizar uma aplicação de PCA com dados MSG e MODIS percebe-se que os produtos conseguem abstrair padrões de sazonalidade de uso do solo. Entretanto, na classificação não-supervisionada pode-se perceber o diferencial dos satélites geoestacionários para classificação das principais classes de uso do solo, pois, mesmo em uma série temporal curta, apresentou resultados de concordância substancial para agricultura anual e considerável para pastagem e natural. Demonstrando que o aumento da resolução temporal, devido menor intervalo entre as observações, proporciona maior capacidade de abstração e diferenciação da sazonalidade.

Este estudo possibilitou melhor compreensão de dados de satélite de órbita geoestacionária para obtenção de índice de vegetação, especificamente o NDVI, apresentando características, técnicas e operações que podem fornecer um produto de maior qualidade, bem como avaliando o potencial de aplicação no monitoramento da superfície do solo. Tal estudo pode ser expandido futuramente para obter índices de vegetação por outros satélites geoestacionários, como para as novas séries GOES e Himawari que, a partir do sensor ABI (*Advanced Baseline Imager*), fornecem dados com alta resolução temporal (25 minutos) e média resolução espacial (500 m a 1 km) em 16 bandas espectrais, incluindo as bandas RED e NIR, utilizadas para obtenção do NDVI, podendo assim, representar uma revolução no monitoramento da superfície do solo.

4.6. Referências

- ALI, A.; DE BIE, C. A. J. M.; SKIDMORE, A. K. Detecting long-duration cloud contamination in hyper-temporal NDVI imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 24, p. 22–31, 2013.
- ALMEIDA, T. I. R.; PENATTI, N. C.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E.; DO AMARAL, C. H.. Principal component analysis applied to a time series of MODIS images: the spatio-temporal variability of the Pantanal wetland, Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, n. 4, p. 737–748, 2010.
- ALPARONE L.; AIAZZI B.; BARONTI S.; GARZELLI A. **Remote Sensing Image Fusion**. (ebook) New York: CRC Press: Taylor & Francis Group, 2015, 328 p.
- AMATO, U.; ANTONIADIS, A.; CUOMO, V.; CUTILLO, L.; FRANZESE, M.; MURINO, L.; SERIO, C. Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 750–766, 2008.
- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 949-981, 2013.
- BEISL, U. **Correction of Bidirectional Effects in Imaging Spectrometer Data**. Remote Sensing Series, n. 37. Zurich: Remote Sensing Laboratories, 2001. 205 p.
- BÉTHUNE S.d. , MULLER F., e BINARD M. Adaptive intensity matching filters: a new tool for multiresolution data fusion. In **PROCEEDINGS OF MULTISENSOR SYSTEMS AND DATA FUSION FOR TELECOMMUNICATIONS, REMOTE SENSING AND RADAR, AGARD CONFERENCE PROCEEDINGS** 595. **Proceedings...** Lisboa, 1997. Disponível em: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a346266.pdf> . Acesso: 06 out. 2017. p. 28.1–28.15.
- BLEY, S.; DENEKE, H. A threshold-based cloud mask for the high-resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n.10, p. 2713–2723, 2013.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento do Uso e Cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado**, Brasília, DF, 2015. 69 p.
- CHEN, J., JÖNSSON, P., TAMURA, M., Gu, Z., MATSUSHITA, B., & EKLUNDH, L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based

on the Savitzky-Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3–4, p. 332–344, 2004.

CRACKNELL, A. P. Review article Synergy in remote sensing what's in a pixel ? International **Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2025–2047, 1998.

DERRIEN, M; LE GLÉAU, H. MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, p. 4707 – 4732, 2005.

FENSHOLT, R.; ANYAMBA, A.; HUBER, S.; PROUD, S. R.; TUCKER, C. J.; SMALL, J.; et al. Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary MSG SEVIRI data compared to Polar Operational Environmental Satellite data for land surface monitoring in Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 721–729, 2011.

FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; STISEN, S.; e TUCKER, C. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. *Remote Sensing of Environment*, v. 101, p. 212–229, 2006.

GAO, F.; JIN, Y.; LI, X.; SCHAAF, C. B. Bidirectional NDVI and Atmospherically Resistant BRDF Inversion for Vegetation Canopy. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 6, p. 1269–78, 2002.

GARCIA, F. N. Monitoramento das pastagens cultivadas no cerrado goiano a partir de imagens MODIS índices de vegetação (mod13q1). **Dissertação** (Dissertação em Geografia). Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, 2012. 61 p.

GDAL. **Geospatial Data Abstraction Library**. Disponível em: <<http://www.gdal.org/>>. Acesso: 08 nov. 2017.

GOMESDANS, J. **BRDF modelling with python and MODIS data**, 2015. Disponível em: <https://jgomezdans.github.io/brdf-modelling-of-modis-land-surface-data.html>. Acesso: jul. 2017.

GURGEL, H. C., & FERREIRA, N. J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 18, p. 3595–3609, 2003.

HIROSAWA, Y.; MARSH, S. E.; KLIMAN, D. H. Application of standardized principal component analysis of land-cover characterization using multitemporal AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 267–281, 1996.

- HOCKING, J.; FRANCIS, P. N.; & SAUNDERS, R. Cloud detection in Meteosat Second Generation imagery at the Met Office. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 307–323, 2011.
- HUBANKS, P.; PATNICK, S.; KING, M.; RIDGWAY, B. **MODIS Atmosphere L3 Gridded Product Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) & Users Guide**. 2015. Disponível em: https://modis-images.gsfc.nasa.gov/_docs/L3_ATBD_2008_12_04.pdf. Acesso: jul. 2017.
- JONES, H.G.; VAUGHAN, R. A. **Remote sensing of vegetation: principles, techniques and applications**. 1. ed. Oxford University Press: New York, 2010.
- KARATHANASSI, V.; KOLOKOUSIS, P.; IOANNIDOU, S. A comparison study on fusion methods using evaluation indicators. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 10, p. 2309–2341, 2007.
- KOTCHENOVA, S. Y. e VERMOTE, E. F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data . Part II . Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. **Applied Optics**, v. 46, n. 20, 2007.
- KOTCHENOVA, S. Y.; VERMOTE, E. F.; LEVY, R.; LYAPUSTIN, A. Radiative transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study. **Applied Optics**, v. 47, n. 13, p. 2215–2226, 2008.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.
- LEE, C. S.; YEOM, J. M.; LEE, H. L.; KIM, J. J.; HAN, K. S. Sensitivity analysis of 6S-based look-up table for surface reflectance retrieval. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 1, p. 91–101, 2015.
- MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Em: Berkeley Symposium on Mathematical Statistic and Probability, 5, Berkley. **Proceedings...** Berkley: University of California Press, Berkley, 1967. p. 281 – 297. Disponível em: <https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200512992>. Acesso: out. 2017.
- PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 2, p. 559 – 572, 1901.
- PROUD, S. R.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SANDHOLT, I. A comparison of the effectiveness of 6S and SMAC in correcting for atmospheric interference of

- Meteosat Second Generation images. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D17209, p. 1 – 14, 2010.
- PROUD, S. R.; SCHAAF, C.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, M. O.; SHISANYA, C.; MUTERO, W.; et al. The Normalization of Surface Anisotropy Effects Present in SEVIRI Reflectances by Using the MODIS BRDF Method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 10, p. 6026 – 6039, 2014.
- QU, Y.; LIU, Q.; LIANG, S.; WANG, L.; LIU, N.; LIU, S. Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from modis data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 907–919, 2014.
- RAHMAN, H.; DEDIEU, G. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 1, p. 123 – 143, 1994.
- ROUJEAN J.-L.; LEROY M.; DESCHAMPS P.-Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. 92, p. 20.455 – 20.468, 1992.
- ROUMANI, H. **Free fortran compilers**, 2015. Disponível em: <<http://www.cse.yorku.ca/~roumani/fortran/ftn.htm>> . Acesso: jul. 2017.
- RULINDA, C. M., BIJKER, W., e STEIN, A. Image mining for drought monitoring in eastern Africa using Meteosat SEVIRI data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12S, p. S63–S68, 2010.
- RULINDA, C. M.; BIJKER, W.; STEIN, A. The chlorophyll variability in Meteosat derived NDVI in a context of drought monitoring. **Procedia Environmental Sciences**, v. 3, p. 32–37, 2011.
- SARR, M. A.; LACAZE, B. Caractérisation de la dynamique de la végétation en Afrique de l'Ouest : comparaison des indices NDVI de MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR (exemple du Ferlo, Sénégal). In Texte issu d'une communication au colloque Météosat Seconde Génération : un nouvel outil de suiv., p. 1–10, 2008. Disponível em: <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260971>>. Acesso: out. 2017.
- SCHAFF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83 n. 1-2, p. 135–148, 2002.

- SCHMETZ, J.; PILI, P.; TJEMKES, S.; JUST, D.; KERKMANN, J.; ROTA, S.; RATIER, A. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 7, p. 991–991, 2002.
- SCHOWENGE, R. A. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, n. 10, p. 1325–1334, 1980.
- SILVEIRA, C. R.; FERREIRA, L. G.; SILVA, B. B. Análise da correção geométrica por meio de função de refletância bidirecional da superfície em dados de satélite geoestacionário. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Santos, 2017. Disponível em: <<https://proceedings.galoa.com.br/sbsr>>. Acesso: 26 out. 2017. p. 438 – 445.
- SOBRINO, J. A.; JULIEN, Y.; SORIA, G. Phenology estimation from meteosat second generation data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1653–1659, 2013.
- SOLANO, R.; DIDAN, K.; JACOBSON, A.; HUETE, A. 2010. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)**. Disponível em: <https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf>. Acesso: 10 mai. 2017.
- TARAVAT, A.; PROUD, S.; PERONACI, S.; DEL FRATE, F.; OPPELT, N. Multilayer Perceptron Neural Networks Model for Meteosat Second Generation SEVIRI Daytime Cloud Masking. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1529–1539, 2015.
- THIES, B.; BENDIX, J.. Satellite based remote sensing of weather and climate: Recent achievements and future perspectives. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 262–295, 2011.
- TIAN, E.; FENSHOLT, R.; VERBESSELT, J. GROGAN, K.; HORION, S.; WANG, Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 163, p. 326-340, 2015.
- TOOLBOX. Orfeo toolbox is not a black Box. 2016. Disponível em: <<https://www.orfeo-toolbox.org/>>. Acesso em: 26 out. 2017.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment** v. 150, p. 127-150, 1979.
- VERMOTE, E. F.; KOTCHENOVA, S. Y.; RAY, J. P. **Modis Surface Reflectance User's Guide**. 2011. Disponível em: <http://modis-sr.ltdri.org/guide/MOD09_UserGuide_v1_3.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2017.

- VERMOTE, E. F.; TANRE, D. ; DEUZE, J. J. ; HERMAN, M. ; MORCRETTE, J.; KOTCHENOYE, S. Y. Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV), 6S user guide. 2006. Disponível em: <<http://6s.ltdri.org/>>. Acesso em: 26 out. 2017.
- VERMOTE, E. F.; TANR, D.; DEUZ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.-j. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum , 6S : An Overview. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675–686, 1997.
- VERMOTE, E. F.; VERMEULEN, A. **Atmospheric Correction Algorithm:** Spectral Reflectances (MOD09). ATBD version 4. 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf> Acesso: 26 out. 2017. 1–107 p.
- WANNER, W.; LI, X.; STRAHLER, A. H. On the derivation of kernel for kernel-driven models of bidirectional reflectance. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 21.077–21.089, 1995.
- WILSON, R. T. Py6S: A Python interface to the 6S radiative transfer model. **Computers and Geosciences**, v. 51, p. 166–171, 2013.
- WITHARANA, C.; CIVCO D. L., e MEYER T. H. Evaluation of pansharpening algorithms in support of earth observation based rapid-mapping workflows. **Applied Geography**, v. 37, n. 1, p. 63–87, 2013.

Capítulo 5 : Monitoramento da superfície do solo usando dados de satélite de órbita geoestacionária

Resumo

O satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10 possui bandas espectrais que permitem obter indicadores de vegetação. O mesmo apresenta como principais diferenças, quando comparado a satélites de órbita polar, a alta resolução temporal e baixa resolução espacial. Devido à baixa resolução espacial é pouco utilizado para monitoramento da superfície do solo, no entanto, representa alternativa relevante quando utilizado em recortes espaciais em que essa característica não é uma limitação. A bacia hidrográfica é o recorte territorial reconhecido e bastante utilizado que, para ser efetiva, deve ser integrada e considerar os aspectos, físicos, sociais e econômicos. Com efeito, indicadores como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), eficiente para o monitoramento da vegetação devido à simplicidade e estreita relação com a produtividade da vegetação, e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), que indica a umidade da superfície do solo combinando o solo e a vegetação expostos, ajudam a compreender a sazonalidade ambiental e ocupação das bacias hidrográficas. Esse artigo tem como objetivo avaliar a capacidade de indicadores biofísicos (NDVI e NDWI), provindos do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10, para o monitoramento ambiental da superfície do solo, tendo como área de estudo bacias hidrográficas, Ottobacias nível 5, do estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal, no período 2013 a 2015. Para tanto, foram avaliados o NDVI, NDWI e a precipitação com resolução temporal de 12 dias e mensal. Fez-se o cálculo dos indicadores normalizados SPI (*Standard Precipitation Index*), SVI (*Standard Vegetation Index*) e SWI (*Standard Water Index*) para comparações entre os anos e obtenção da tendência de cada indicador. Como resultado, pode-se identificar e compreender padrões sazonais das bacias hidrográficas em diferentes regiões e classes de uso. O NDVI e o NDWI apresentaram maior correlação com a precipitação de dois meses atrás ($r > 0,84$) e alta correlação entre si ($r > 0,94$), sendo que o NDWI apresenta maior sensibilidade, comparado ao NDVI, na abstração do comportamento sazonal. Utilizando os indicadores normalizados pode-se identificar a diferença de precipitação entre os anos, o que influenciou diretamente na diminuição da produtividade agrícola da primeira safra. O NDVI apresentou tendência negativa em todas as bacias, a precipitação tendência positiva apenas em bacias do sudeste goiano, e o NDWI tendência negativa em grande parte das bacias, porém, positiva em determinadas bacias ao noroeste e nordeste do estado de Goiás. Ao avaliar em menor resolução espacial percebe-se que o menor estresse hídrico no nordeste está relacionado com queimadas em áreas de unidades de conservação e mudanças de uso do solo e no noroeste devido à ocorrência de processos de recuperação de pastagens. Os resultados demonstram o potencial de indicadores de vegetação a partir de dados de satélites geoestacionários, particularmente o Meteosat-10, para o monitoramento da cobertura do solo em bacias hidrográficas, bem como apresenta a maior sensibilidade do NDWI para o monitoramento de mudanças ocorridas na superfície.

Palavras-chave: NDVI, NDWI, satélite de órbita geoestacionária.

5.1. Introdução

A maioria de estudos relacionados ao monitoramento da superfície da Terra faz uso de dados provenientes de satélites de órbita polar para obtenção de indicadores ambientais. Esses satélites apresentam alta ou média resolução espacial (1 km a 30 m) e baixa resolução temporal (1 a 16 dias), como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Chen et al., 2005; Gu et al., 2007), Landsat 5 (Gonzaga et al., 2011; Machado et al., 2014; Oliveira et al., 2010; Weng e Fu, 2014), Landsat 8 (Silva et al., 2017) e SPOT-VEG (*Satellite Pour l'Observation de la Terre Vegetation*) (Ezzine et al., 2014; Jovanovic et al., 2014; Barbosa et al., 2015). Porém, pouco se tem investigado o potencial de satélites de órbita geoestacionária para o monitoramento da superfície da Terra.

Tal alternativa tornou-se relevante a partir da série MSG (*Meteosat Second Generation*) uma vez que o sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) fornece a reflectância das bandas RED (vermelho), NIR (infravermelho próximo) e SWIR (infravermelho de ondas curtas) úteis para o monitoramento da vegetação. Particularmente, dentre os satélites da série MSG, o Meteosat-10 está localizado a 0° de latitude e longitude cobrindo a Europa, África, oeste do Oriente Médio e nordeste da América e apresenta alta resolução temporal (15 minutos) e baixa resolução espacial (3 km, à nadir) (Schmetz et al., 2002). Este satélite mostra-se eficiente para o monitoramento da superfície em regiões da África, apresentando alta correlação espacial com dados de satélites polares (Sarr e Lacaze, 2008; Fensholt et al., 2011), sendo utilizado na análise e comportamento do estresse da vegetação (Rulinda et al., 2010, 2011) e estimativas de fenologia (Sobrino et al., 2013).

Devido característica de alta resolução temporal, quando comparado a satélites de órbita polar, os satélites de órbita geoestacionária possibilitam a compreensão de fatores sazonais e antrópicos com maior detalhamento temporal (Fensholt et al., 2006). Assim, em períodos de alta precipitação, que ocasionam cobertura de nuvens, os satélites de órbita polar obterão uma pequena quantidade de observações, mesmo em composição de dias, diferente dos satélites orbitais geoestacionários que podem obter mais do que uma imagem durante o dia, tendo mais oportunidades para observação da superfície (Fensholt et al., 2006; Fensholt et al., 2010). Da mesma forma, permitem estudar a reflectância da superfície em diferentes intervalos do dia, com diferentes condições de iluminação, possibilitando maior compreensão de características da

vegetação. Por outro lado, o MSG apresenta desvantagens que limitam a utilização do dado, como a baixa resolução espacial e o alto ângulo de visada das observações.

Entretanto, quando se deseja observar a superfície em escala espacial menor pode-se utilizar uma resolução espacial mais baixa do que o convencional, de tal forma que a baixa resolução espacial dos satélites de órbita geoestacionária deixa de representar uma limitação, tornando assim o dado interessante devido a sua maior resolução temporal. Essas escalas, comparadas à escala local, permitem melhor estudo e compreensão de fenômenos que abrangem áreas maiores, fornecendo uma visão mais ampla no estudo de mudanças de uso e cobertura do solo e tendências sócio-econômicas.

Uma categoria geográfica regional bastante utilizada é o recorte territorial de bacias hidrográficas para gestão de recursos que, para ser efetiva, deve ser integrada e considerar todos os aspectos, físicos, sociais e econômicos. Historicamente, a paisagem de bacias hidrográficas tomou relevância quando apresentada pela ONU (Organização das Nações Unidas) no início dos anos 90 durante a Conferência de Dublin (que antecedeu a Eco-92), sendo sugerida a gestão de recursos hídricos baseada no recorte territorial de bacias hidrográficas (Porto e Porto, 2008). Posteriormente, no Brasil, a Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e definiu que “a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a operacionalização dessa política e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (Brasil, 1997). Assim, a bacia hidrográfica é reconhecida como o “palco unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural” (Yassuda, 1993). No entanto, para uma gestão efetiva torna-se importante o monitoramento de indicadores biofísicos da bacia hidrográfica, que podem ajudar a estabelecer condições de uso e ocupação sustentáveis. Com esse monitoramento, é possível, por exemplo, diagnosticar alterações antrópicas e naturais na paisagem, e orientar ou estabelecer políticas de reversão de um quadro de degradação ambiental (Cunha et al., 2012).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) representa um indicador eficiente para o monitoramento da vegetação devido à simplicidade conceitual e estreita relação com a produtividade da vegetação (Tian et al., 2015). Definido pela diferença normalizada das bandas espectrais do NIR e RED é representado por valores entre -1 e 1, tendo valores baixos para solo exposto e valores altos para áreas com grande cobertura vegetal (Tucker, 1979). Já o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) é

um indicador de água ou umidade na superfície, relacionando a quantidade de água por unidade de área na vegetação (Gao, 1996), representa uma medida da umidade da superfície do solo combinando o solo e a vegetação expostos, porém, não podendo ser considerado uma medida de teor de água do solo (Jovanovic et al., 2014). Definido pela diferença normalizada das bandas espectrais do NIR e SWIR é representado por valores entre -1 e 1, tendo valores negativos para vegetação com grande quantidade de folhas ou galhos secos e valores positivos para vegetação com grande quantidade de folhas ou galhos verdes. O NDVI é considerado o mais popular índice para estudo da saúde vegetal e produção de culturas, sendo utilizado em pesquisas e ações de tomada de decisão (Atzberger, 2013). Por outro lado, o NDWI ainda está em fase de desenvolvimento, por ser um índice mais novo e pouco explorado, e necessita de maiores investigações em relação ao seu potencial e sensibilidade ao teor de água na vegetação (Chen et al., 2005; Ezzine et al., 2014).

De maneira geral, esses índices juntos são eficientes para analisar a resposta espectral da cobertura vegetal, possibilitando a espacialização dos valores e consequentemente a identificação de uso e cobertura do solo (Albuquerque et al. 2014). Como o NDVI é um índice sensível ao verdor da vegetação e o NDWI ao teor de água, os índices apresentaram uma forte correlação (Gonzaga et al., 2011). Porém, como o NDWI é influenciado tanto pelo ressecamento quanto pelo murchamento da vegetação, pode ser um indicador mais sensível do que NDVI para monitoramento da seca (Gu et al., 2007), fornecendo informações relacionadas ao estado em que se encontra a vegetação natural (Gu et al., 2007; Silva et al., 2017) e de culturas como soja e milho (Chen et al., 2005) e, assim, fornecer subsídios aos planejadores públicos quanto ao gerenciamento do uso e cobertura do solo em regiões de bacias hidrográficas (Oliveira et al., 2010).

Com efeito, o estudo de indicadores biofísicos de bacias hidrográficas pode ser feito com dados de satélites de órbita geoestacionária, como o Meteosat-10, podendo apresentar, devido sua alta resolução temporal, resultados pertinentes em relação a mudanças de uso e cobertura do solo. Esse artigo tem como objetivo avaliar a capacidade de indicadores biofísicos (NDVI e NDWI), provindos do satélite de órbita geoestacionária Meteosat-10, no período 2013 a 2015, para o monitoramento ambiental da superfície do solo, para tanto fez-se uso de recorte de bacias hidrográficas Ottobacias nível 5.

5.2. Área de estudo

A área de estudo corresponde ao estado de Goiás incluindo o Distrito Federal que possuem, respectivamente, uma área de 340.111 km² e 5.802 km². Localizados na região Centro-Oeste do Brasil, e se estendem entre 12° 23' 46" S e 19° 29' S e entre 45° 54' 25 W e 53° 14' 54" W. Estão inseridos dentro do bioma Cerrado, tendo apenas uma pequena parte a sudeste do estado de Goiás caracterizada como Mata Atlântica (Brasil, 2015). Do ponto de vista hidrográfico, correspondem a uma área de dispersão dos cursos d'água que vão compor as grandes bacias hidrográficas brasileiras, como as bacias Tocantins, São Francisco e Paraná (ANA, 2016).

O clima é caracterizado como tropical semiúmido em boa parte do estado e úmido na região sudoeste, com duas estações definidas: verão úmido e inverno seco. Com características monçônicas marcantes, 80% das chuvas caem de novembro a março, enquanto que de maio a setembro, o tempo é seco com poucas chuvas (IBGE, 2002), sendo os meses de transição abril e outubro, respectivamente, de estação chuvosa para seca e de estação seca para chuvosa. Quanto à cobertura vegetal, a área de estudo encontra-se destituída da vegetação original em grande parte de seu território (Brasil, 2015), sendo que o cerrado no Brasil central foi amplamente convertido em agricultura e pastagem, e essa conversão tem implicações importantes para as mudanças climáticas e nas mudanças nos fluxos de carbono entre a atmosfera e a superfície terrestre (Ratana et al., 2005).

Para o estudo das bacias hidrográficas foi utilizada a subdivisão de Ottobacias nível 5. Esse método de classificação e codificação de bacias hidrográficas, desenvolvido por Otto Pfafstetter, caracteriza-se por ser um método natural, hierárquico, baseado na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem e de fácil integração com os SIGs (Sistemas de Informação Geográfica), sendo o nível de codificação 5 adotado para fins de gestão dos recursos hídricos (Galvão e Meneses, 2005). Como referência de classes de uso do solo foi utilizado o mapa TerraClass Cerrado - Mapeamento do Uso e Cobertura Vegetal do Cerrado (Brasil, 2015). A Figura 5.1 apresenta a área de estudo e sua subdivisão em bacias hidrográficas, considerando as classes de uso da terra predominantes (área maior do que 50% para uma das classes de uso avaliadas), tendo-se a maioria das bacias classificada como pastagem (182), seguida

de vegetação natural (119) e agricultura anual (9). Porém, muitas bacias apresentam uso do solo mais diversificado, que foram classificadas com o termo “mistura” (84).

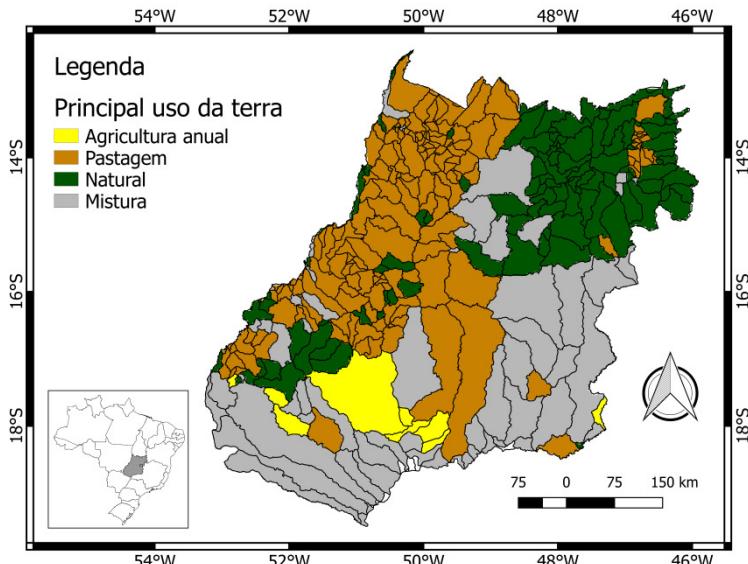


Figura 5.1. Área de estudo subdividida em Ottobacias nível 5, classificadas conforme predominância de uso do solo (maior do que 50% da área) conforme Mapa Terraclass 2013 (MMA, 2015).

5.3. Metodologia

O diagrama da metodologia proposta é apresentado na Figura 5.2, no qual estão representadas as bases de dados de entrada (azul), os processos (cinza) e os resultados analisados (verde). Em relação às bases de dados utilizadas, os índices NDVI e NDWI com resolução temporal diária foram obtidos a partir de dados do satélite de órbita geoestacionária da série MSG (*Meteosat Second Generation*), o Meteosat-10. Ele fornece imagens em 12 bandas (1 visível, 3 infravermelho, 7 termais e 1 pancromática), a partir do sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) com resolução temporal de 15 minutos, resolução radiométrica de 10 bits e resolução espacial de 3 km para as bandas multiespectrais e 1 km para a banda pancromática (Schmetz et al., 2002). Foram utilizados dados HRIT (*High-Rate Image Transmission*) nível 1.5, que são imagens georreferenciadas e radiometricamente pré-processadas com resolução espacial de 3 km.

A precipitação mensal foi obtida a partir de produto 3A26 do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), que corresponde à precipitação mensal total para o período de um mês com resolução espacial de 5°. Os produtos deste satélite apresentam alta correlação com dados de estações meteorológicas de superfície para o Brasil, bioma Cerrado (Farias, 2016) e especificamente, para o estado de Goiás (Farias et al., 2013). O TRMM foi uma missão conjunta entre a NASA e a JAXA (Agência Japonesa de

exploração Aeroespacial) projetado para monitorar e estudar as chuvas tropicais, disponibilizando dados no período de 1997 a 2015 (PMM, 2017).

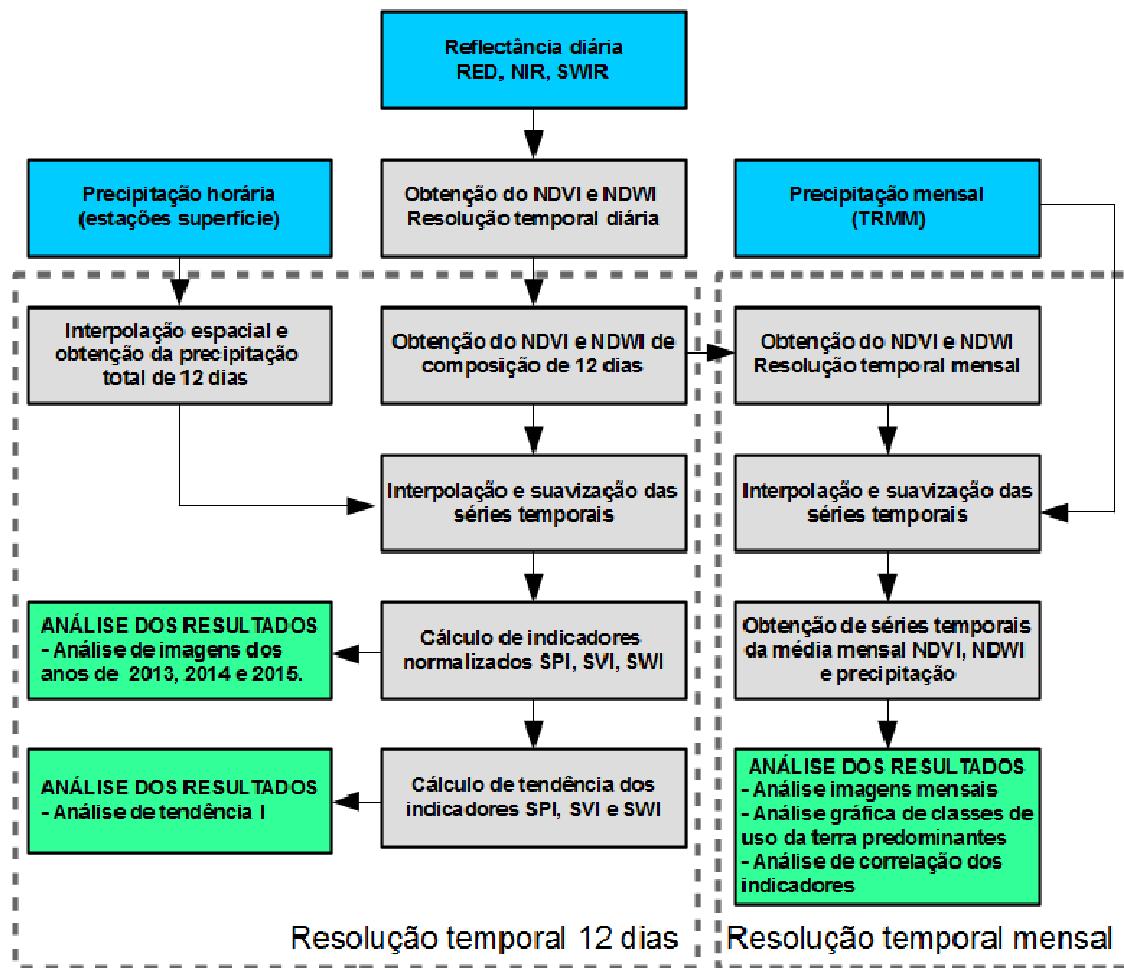


Figura 5.2. Diagrama da metodologia do trabalho, destacando processos em resolução temporal de 12 dias e mensal. Os retângulos representam bases de dados (azuis), processos (cinzas) e resultados avaliados (verdes).

Inicialmente, para obtenção do NDVI e NDWI com resolução temporal diária, fez-se a correção atmosférica utilizando a técnica 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*), nas bandas espectrais envolvidas (RED, NIR e SWIR). O 6S modela as interações atmosféricas com a radiação a partir de um número discreto de camadas homogêneas (Vermote et al., 1997). Em seguida, obtiveram-se os índices diários utilizando o procedimento MVC (*Maximum Value Composite*) com imagens no intervalo de 10:00 h às 12:00 h, hora local. Utilizou-se o produto máscara de nuvens (CLM) para filtrar a cobertura de nuvens sobre os pixels. A partir dos índices diários obtiveram-se os índices com resolução temporal de 12 dias e mensal. O intervalo de 12 dias foi utilizado por ser o menor intervalo de tempo em que se obtém alta cobertura sobre a área de estudo (mais do que 95%) e o intervalo mensal corresponde à média

ponderada das imagens no intervalo de 12 dias que fazem parte do respectivo mês. Observa-se que para esse intervalo de dias e horário pode-se obter até 108 observações no período (9 imagens por dia durante 12 dias), diferente de satélites de órbita polar, como o MODIS, que obtém apenas uma imagem por dia. Foi utilizado um recorte temporal de 3 anos, no período 2013 a 2015.

Com o intuito de obter a precipitação com resolução de 12 dias, mesma resolução temporal da composição do MSG, utilizou-se dados de precipitação horária de estações meteorológicas automáticas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (INMET, 2017). Fez-se a soma de precipitação de 12 dias e interpolação espacial para a área de estudo. Foram utilizados dados de 92 estações meteorológicas, sendo 26 localizadas dentro da área de estudo e as demais localizadas em outros estados (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Tocantins, Pará, Piauí e Maranhão) a uma distância que variou de 200 a 500 km dos limites da área de estudo. Com efeito, ao se considerar as estações ao redor da área de estudos tem-se um maior quantitativo de dados para representar a precipitação, melhorando a qualidade da estimativa como um todo, principalmente em áreas com estações esparsas.

Para diminuir o ruído nas imagens do NDVI e NDWI realizaram-se os procedimentos de pré-processamento dos dados (De Almeida et al., 2015) com a interpolação de pixels sem informação, utilizando dados da própria série temporal, e de suavização da série temporal, utilizando o filtro Savitzky-Golay aplicado em cada um dos pixels. Em seguida, fez-se uma média para cada um dos meses do ano, obtendo como resultado 12 imagens de NDVI, NDWI e precipitação com resolução temporal mensal. Os valores apresentados correspondem à média de valores para cada bacia hidrográfica. Nesta etapa utilizaram-se dados do TRMM com resolução temporal mensal. A resolução mensal foi utilizada por apresentar menos imagens do que a resolução de 12 dias, que resultaria em 30 imagens, além de destacar a variação sazonal com maior intensidade, bem como apresentar um dado mais confiável para as regiões noroeste e norte do estado de Goiás, onde a distribuição de estações de superfície é mais esparsa.

Fez-se uma análise das imagens resultantes com o intuito de identificar padrões e especificidades sazonais. Também foram obtidos gráficos de séries temporais de bacias hidrográficas com predominância de diferentes classes de uso do solo (agricultura, pastagem, vegetação natural e “mistura”) para melhor compreender as diferentes respostas sazonais em relação à precipitação. Para tanto, devido diferença de intervalo

de valores de cada um dos indicadores, optou-se por utilizar os valores normalizados, a partir da média e desvio padrão das amostras de cada indicador, permitindo assim, uma comparação dos indicadores em mesmo intervalo de valores. Com o intuito de identificar a similaridade entre os indicadores foram avaliadas as correlações entre os indicadores NDVI e NDWI e a correlação entre a precipitação o NDVI e NDWI no tempo.

A partir do NDVI, NDWI e precipitação de resolução temporal de 12 dias fez-se uma análise de tendência. Para tanto, os indicadores foram normalizados e obtiveram-se os correspondentes SVI (*Standard Vegetation Index*), SWI (*Standard Water Index*) e SPI (*Standard Precipitation Index*) com resolução temporal de 12 dias. Os valores correspondem à média de valores para cada bacia hidrográfica. Essas técnicas permitem uma análise de séries temporais destacando as mudanças dos valores dos indicadores ocasionados por variações sazonais ou ações antrópicas entre os anos avaliados. Tal como feito para o monitoramento da estação de seca no Marrocos (Ezzine et al., 2014), para a análise de tendências da dinâmica da vegetação e a relação com a precipitação para a América do Sul (Barbosa et al., 2015) e no estudo da influência da variabilidade pluviométrica na dinâmica da vegetação sobre o Nordeste do Brasil (Barbosa e Lakshmi Kumar, 2016). A Tabela 5.1 apresenta o nome, referência e fórmula dos indicadores normalizados.

A partir desses indicadores geraram-se imagens para a análise de diferenças sazonais interanuais. Bem como, a partir do cálculo do coeficiente angular pelo método dos mínimos quadrados, obteve-se como resultado imagens de tendência do indicador (positiva ou negativa), que indica bacias hidrográficas com mudanças que ocorreram na superfície durante o período avaliado.

Tabela 5.1. Indicadores normalizados e respectivas referência e fórmula.

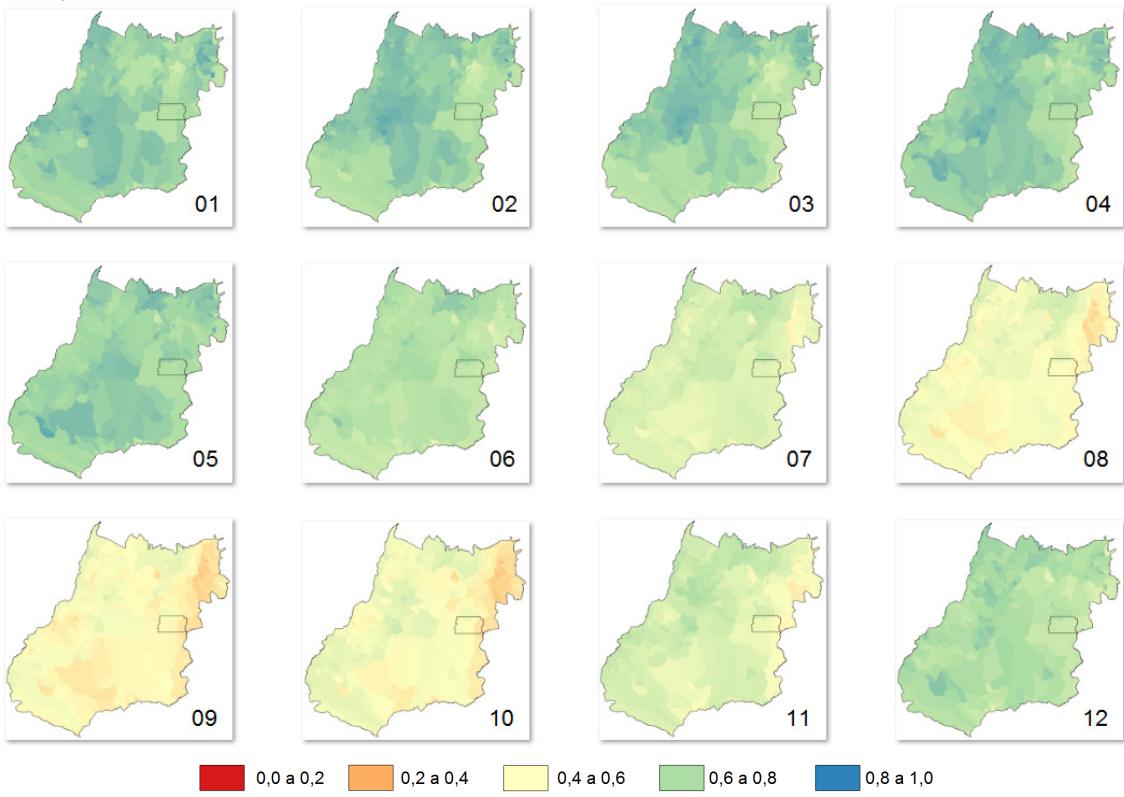
Indicador normalizado	Referência	Fórmula
SPI (<i>Standard Precipitation Index</i>)	McKee et al. (1993)	$Z_{P(ijk)} = \frac{P_{ijk} - \bar{P}_{ij}}{P_{\sigma ij}}, SPI = prob(Z < Z_{P(ijk)})$
SVI (<i>Standard Vegetation Index</i>)	Peters et al. (2002)	$Z_{NDVI(ijk)} = \frac{NDVI_{ijk} - \bar{NDVI}_{ij}}{NDVI_{\sigma ij}}, SVI = prob(Z < Z_{NDVI(ijk)})$
SWI (<i>Standard Water Index</i>)	Ezzine et al. (2014)	$Z_{NWVI(ijk)} = \frac{NDWI_{ijk} - \bar{NDWI}_{ij}}{NDWI_{\sigma ij}}, SWI = prob(Z < Z_{NDWI(ijk)})$

Para o cálculo do SPI, $Z_{P(ijk)}$ é o desvio da média da precipitação em unidades de desvio padrão do pixel i do intervalo j do ano k , P_{ijk} é a medida de precipitação do pixel i do intervalo j do ano k , \bar{P}_{ij} a média de precipitação do pixel i do intervalo j , $P_{\sigma ij}$ o desvio padrão do pixel i do intervalo j . Para o cálculo do SVI, $Z_{NDVI(ijk)}$ é o desvio da média do NDVI em unidades de desvio padrão do pixel i do intervalo j do ano k , $NDVI_{ijk}$ é a medida de precipitação do pixel i do intervalo j do ano k , \bar{NDVI}_{ij} a média de precipitação do pixel i do intervalo j , $NDVI_{\sigma ij}$ o desvio padrão do pixel i do intervalo j . Para o cálculo do SWI, $Z_{NDWI(ijk)}$ é o desvio da média do NDWI em unidades de desvio padrão do pixel i do intervalo j do ano k , $NDWI_{ijk}$ é a medida de precipitação do pixel i do intervalo j do ano k , \bar{NDWI}_{ij} a média de precipitação do pixel i do intervalo j , $NDWI_{\sigma ij}$ o desvio padrão do pixel i do intervalo j . Sendo que o valor j corresponde à ordem de imagens obtidas em um ano no intervalo de 12 dias, representado por valores de 1 a 30. Nota-se que $Z_{P(ijk)}$, $Z_{NDVI(ijk)}$ e $Z_{NDWI(ijk)}$ foram considerados como funções de distribuição padrão normal com média 0 e desvio padrão 1. Sendo $prob$ a distribuição de probabilidade para cada um dos indicadores.

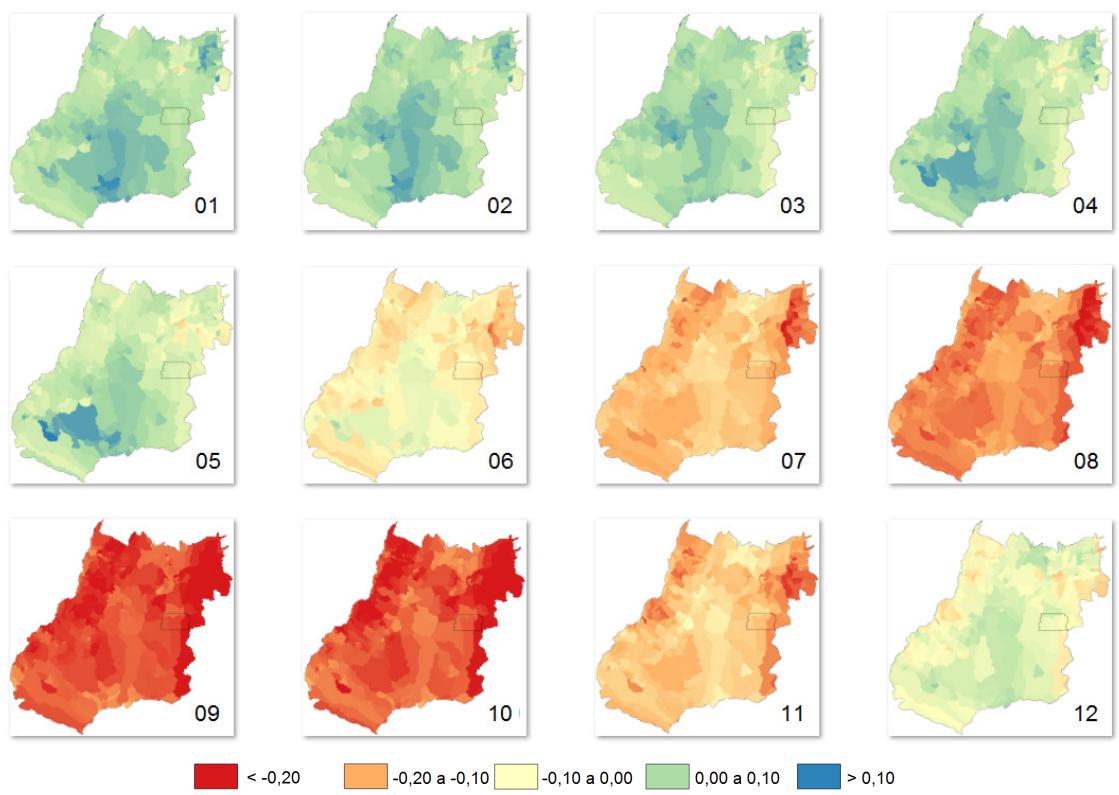
5.4. Resultados

Para analisar os resultados obtidos com os indicadores biofísicos provindos do Meteosat-10 a Figura 5.3 apresenta as médias mensais do NDVI, NDWI e precipitação para a área de estudo, subdividida em bacias hidrográficas, no período de 2013 a 2015. O número na parte inferior direita de cada ilustração corresponde ao mês de referência, de janeiro (01) a dezembro (12).

a) NDVI



b) NDWI



c) precipitação

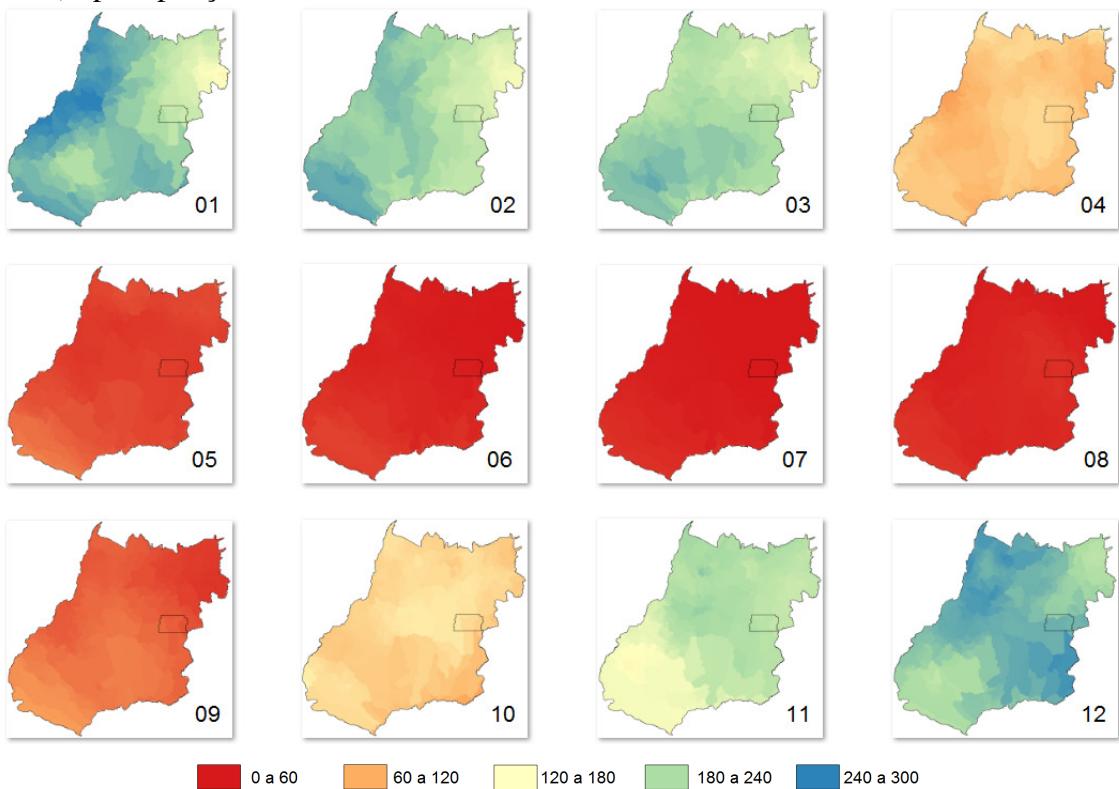


Figura 5.3. Médias mensais do NDVI (a) e NDWI (b) e precipitação (mm) (c) para a área de estudo no período de 2013 a 2015. O número na parte inferior direita de cada mapa corresponde ao mês de referência.

Para análise de séries temporais dos indicadores a Figura 5.4 apresenta gráficos do NDVI, NDWI e precipitação. A normalização foi utilizada para colocar os indicadores em mesmo intervalo de valores, no entanto, caracterizados pelo valor de média 0 e desvio padrão 1. Na figura os gráficos de séries temporais correspondem a bacias hidrográficas com predominância de cada uma das classes avaliadas, sendo: a) agricultura anual, na bacia hidrográfica do ribeirão Santa Bárbara, nos municípios de Goiatuba (ao norte) e Bom Jesus de Goiás (ao sul); b) pastagem, na bacia hidrográfica do córrego Bandeirante, localizada no município de Nova Crixás; c) vegetação natural, na bacia hidrográfica do ribeirão do Meio, localizada no município de Cavalcante; d) “mistura” de usos do solo, sendo formado por agricultura anual (28%), pastagem (32%), vegetação natural (37%) e outros (2%), na bacia hidrográfica do rio dos Patos, localizada nos municípios de Barro Alto (ao norte), Vila Propícia (ao sul) e Goianésia (ao oeste).

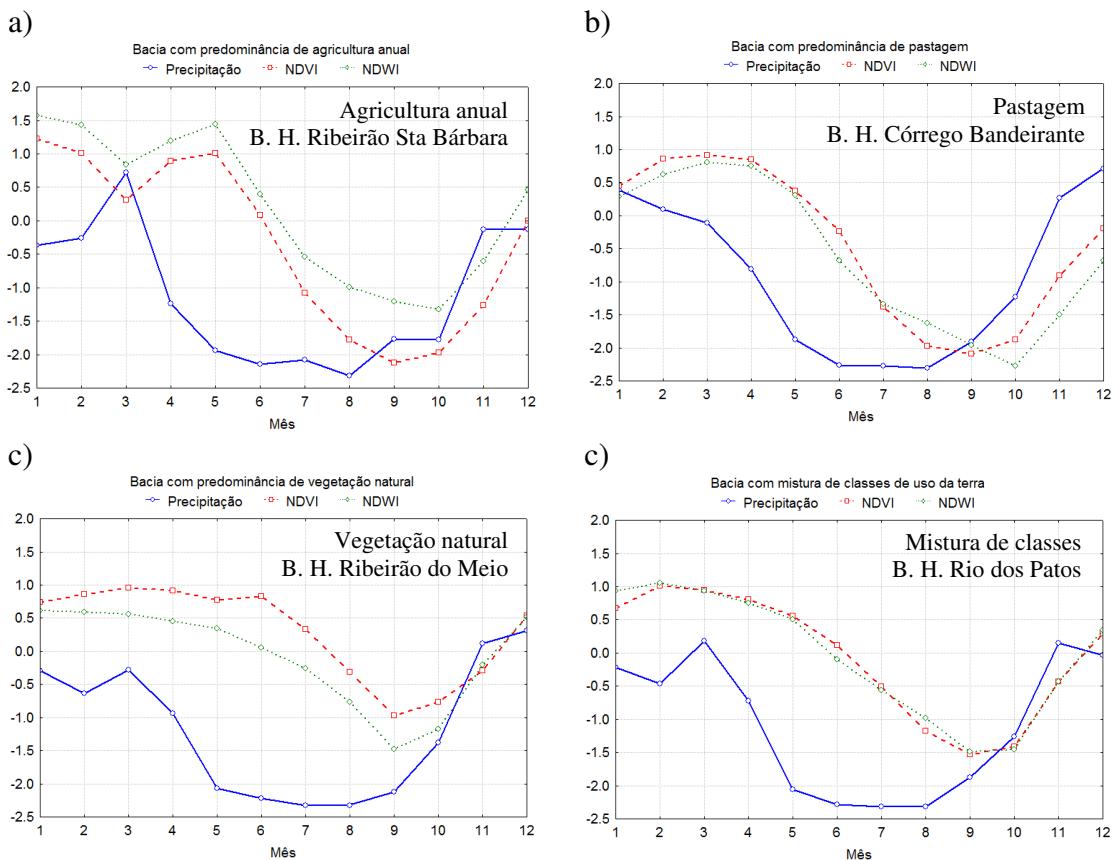


Figura 5.4. Gráficos de séries temporais em bacias com predominância de agricultura (a), pastagem (b), vegetação natural (c) e mistura (d) para os indicadores NDVI, NDWI e precipitação normalizada. Sendo B H. abreviação de Bacia Hidrográfica.

Para análise de correlação entre a precipitação no tempo (t) e os indicadores NDVI e NDWI foram avaliados o mesmo intervalo de tempo (t) e, à posteriori, a precipitação nos tempos ($t+1$), ($t+2$) e ($t+3$). O numeral acrescido ao tempo (t) corresponde à quantidade de meses futuros. A Tabela 5.2 apresenta as correlações obtidas. Não foram observadas diferenças de correlação relevantes entre as diferentes classes de uso avaliadas.

Tabela 5.2. Correlação entre a precipitação no tempo (t) e os indicadores NDVI e NDWI no mesmo tempo (t) e à posteriori nos tempos ($t+1$), ($t+2$) e ($t+3$).

NDVI (t)	NDVI ($t+1$)	NDVI ($t+2$)	NDVI ($t+3$)
$r = 0,4618; p = 0,0$	$r = 0,7745; p = 0,0$	$r = 0,8431; p = 0,0$	$r = 0,6687; p = 0,0$
NDWI (t)	NDWI ($t+1$)	NDWI ($t+2$)	NDWI ($t+3$)
$r = 0,4842; p = 0,0$	$r = 0,6494; p = 0,0$	$r = 0,8762; p = 0,0$	$r = 0,6799; p = 0,0$

A Figura 5.5 apresenta gráficos de dispersão dos indicadores. Como a correlação entre a precipitação e o NDVI e NDWI mostra-se maior para o período de dois meses futuros ($t+2$) escolheu-se apresentar o gráfico de dispersão desta correlação. Além deste, é apresentado o gráfico de correlação do NDVI e NDWI, em mesmo período de tempo (t).

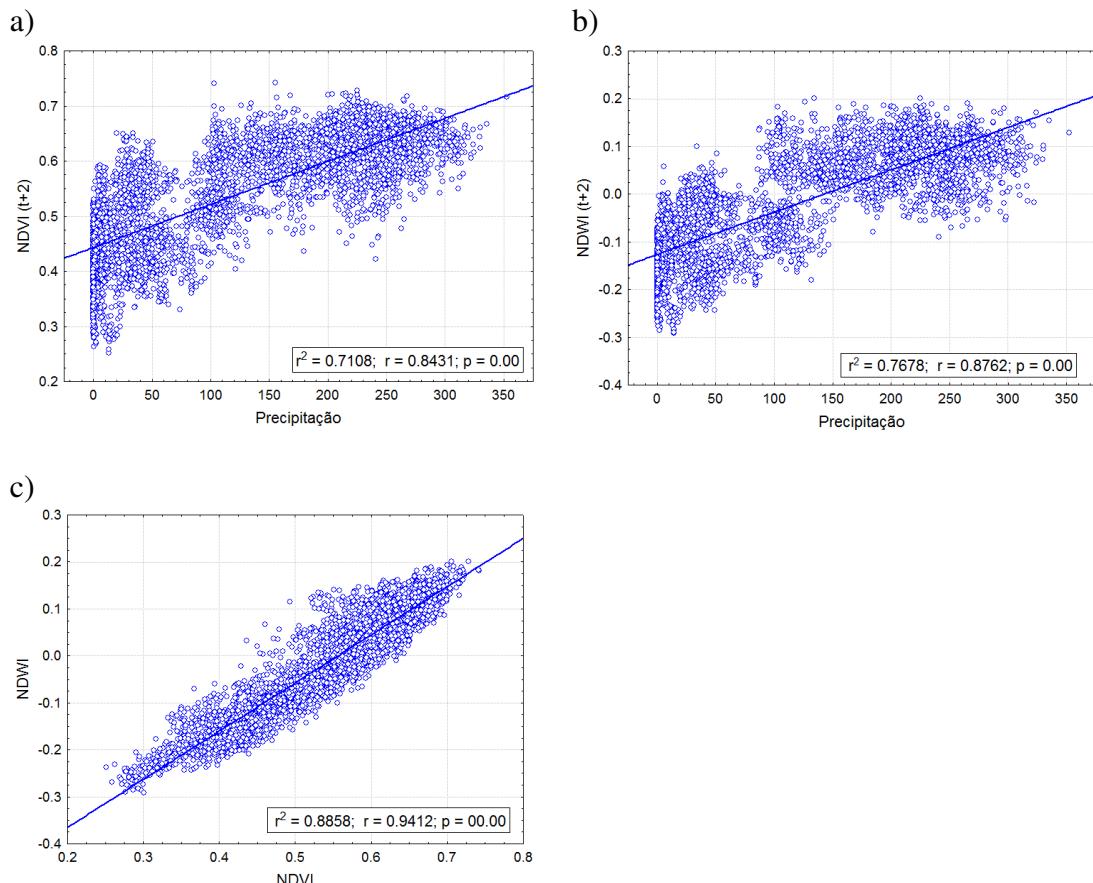


Figura 5.5. Gráficos de dispersão do (a) NDVI ($t+2$) x precipitação (t), (b) NDWI ($t+2$) x precipitação (t) e (c) NDWI x NDVI.

Observam-se nos gráficos de precipitação muitos valores de precipitação próximos de zero, que corresponde ao período de seca. Analisando a correlação de cada bacia separadamente tanto para o NDVI quanto para o NDWI a maioria das bacias apresenta correlação de dois meses (92%), sendo poucas bacias para um mês (8%). As bacias que apresentam correlação do NDVI ou NDWI de apenas um mês (48 bacias), não apresentam diferenças relevantes de classes de uso do solo predominantes, possuindo a mesma proporção de pastagem e vegetação natural (41%), tendo como “mistura” o restante (18%).

Para a análise de tendências fez-se inicialmente o cálculo dos indicadores normalizados SPI, SVI e SWI com resolução temporal de 12 dias para o período de

2013 a 2015, a Figura 5.6 apresenta imagens resultantes para as bacias hidrográficas. Para ilustrar foram escolhidas imagens de estação chuvosa (*doy* 85) para o SVI e SWI, sendo a imagem de precipitação defasada em 60 dias, que corresponde a dois meses (*doy* 025), para os anos de 2013 a 2015.

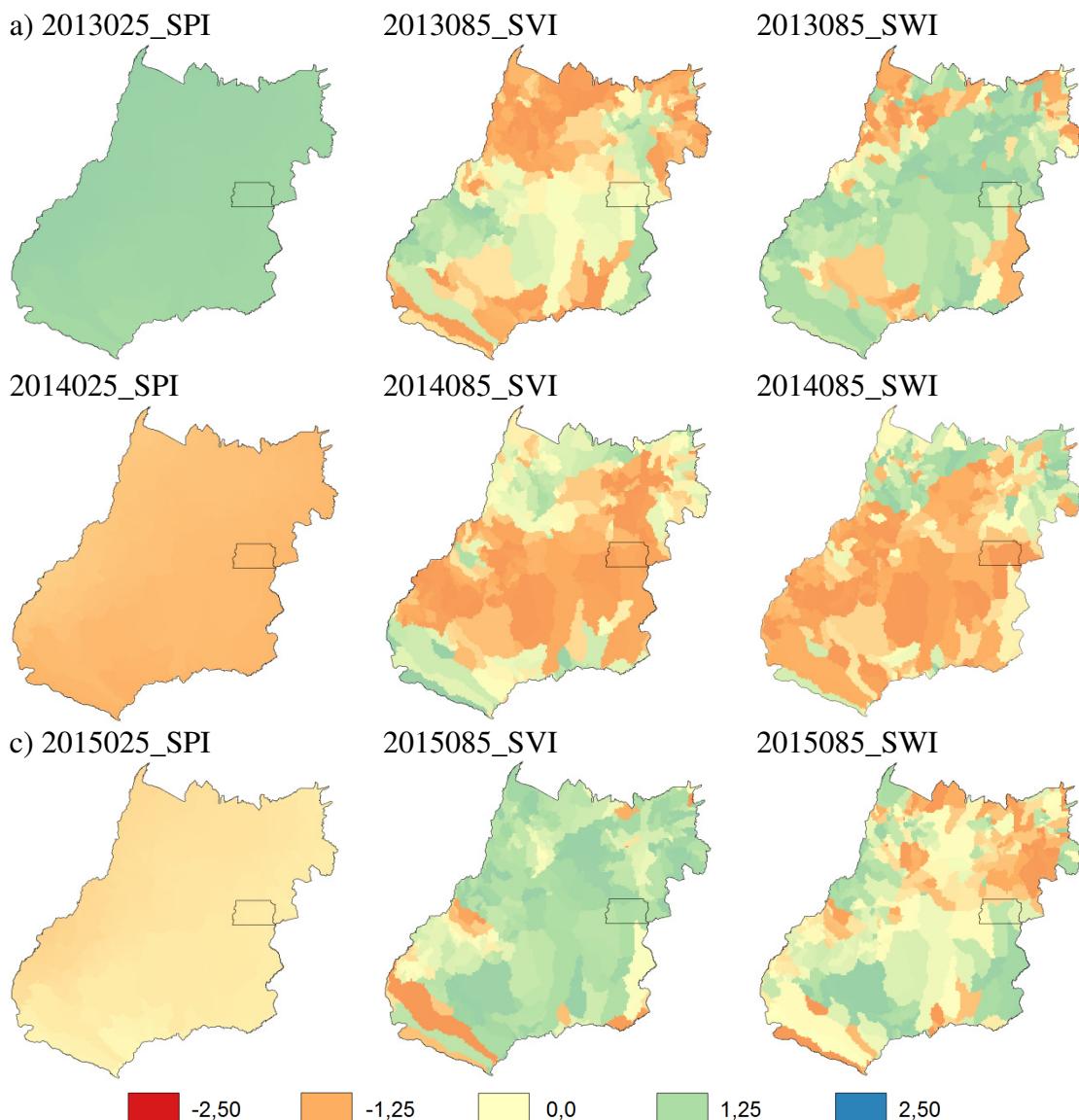
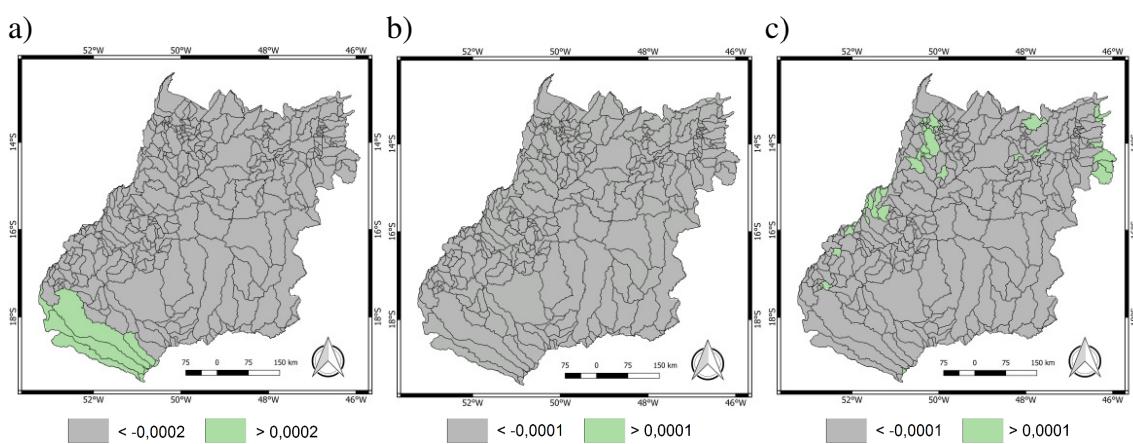


Figura 5.6. Imagens resultantes do cálculo do SPI, SVI e SWI com resolução temporal de 12 dias para os anos de 2013 (a), 2014 (b) e 2015 (c). Foram escolhidas imagens do período de estação chuvosa (*doy* 85) para o SVI e SWI, sendo a imagem de precipitação defasada em dois meses (*doy* 025).

Na parte superior esquerda o termo apresentado é o indicador de data (ano e *doy*), separador (“_”) e o nome do indicador (SPI, SVI e SWI, respectivamente). Esses indicadores são normalizados considerando as imagens de mesmo intervalo, para período de anos avaliados. Assim, permitem melhor visualizar as diferenças entre os anos para os indicadores NDVI, NDWI e precipitação em mesmo intervalo de dias (*doys*). Por exemplo, observa-se que a precipitação em mesmo intervalo (025) é maior

para o ano de 2013 (tons verdes) em toda área de estudo e menor (tons vermelho e laranja) para o ano de 2014.

A Figura 5.7 apresenta as imagens das tendências dos indicadores NDVI, NDWI e precipitação, resultantes dos cálculos do SVI, SWI e SPI, respectivamente, para o período de 2013 a 2015. Os valores de tendência encontrados se concentram em limiares específicos e com pouca variação sobre o valor de referência, sendo quase nula para o SPI e SVI (menor do que 0,0001), e um pouco maior para o SWI (de 0,0001 a 0,0003).



5.5. Discussão

Analizando as médias mensais dos indicadores observa-se a sazonalidade das bacias hidrográficas nas diferentes regiões da área de estudo (Figura 5.3). De modo geral, o NDWI apresenta acentuada sensibilidade à seca da vegetação, com valores baixos (menores do que -0,20) para os meses de julho (07) a novembro (11). Ao comparar com as imagens de precipitação, observa-se que no mês de maio a precipitação diminui consideravelmente, em relação aos meses anteriores (01 a 04), sendo o comportamento perceptível com a diminuição considerável dos valores do NDWI entre as imagens dos meses de maio (05) para o mês de junho (06). Como a precipitação continua muito baixa (ou nula) nos meses seguintes, os valores do NDWI se mantêm negativos. A precipitação volta a aumentar no mês de outubro (10), sendo mais intensa nos meses seguintes (11 e 12), porém o aumento do NDWI ocorre apenas no mês de dezembro (12). Por outro lado, para o NDVI os meses que apresentam menores valores são apenas de julho a outubro (07 a 10), sendo que a precipitação do

mês de outubro, mesmo sendo baixa, já ocasiona um aumento no NDVI no mês posterior (11).

Analisando as diferentes regiões da área de estudo destacam-se o alto NDVI no sudoeste goiano em dois períodos distintos e que indicam o desenvolvimento vegetativo da primeira safra de dezembro a janeiro (12 a 01) e da segunda safra de abril a maio (04 a 05), sendo relativamente maior no período da primeira safra, que representa a principal safra do ano. Observa-se que o NDWI também apresenta essa característica, porém destaca mais o período de primeira safra. Isso se deve ao maior quantitativo de precipitação nos meses anteriores e diferenças climáticas em relação ao restante da área de estudo, como também influências de áreas irrigadas para o cultivo, sobretudo para a soja. No noroeste do estado de Goiás a precipitação concentra-se nos meses de dezembro e janeiro (12 e 01) e, como nessas bacias ocorre predominância de pastagem, há um menor desenvolvimento vegetativo comparado ao centro e sudoeste do estado de Goiás, diferença que se destacam nas imagens do NDWI e de forma mais sutil no NDVI. No nordeste do estado de Goiás, próximo à fronteira com o estado da Bahia, as bacias apresentam baixa precipitação durante o ano, sendo maior apenas em novembro e dezembro (11 e 12) e, como a vegetação natural predominante é rasteira, o desenvolvimento vegetativo é menor, o que é demonstrado pelos baixos valores de NDVI e menores ainda para o NDWI. As bacias na região central do estado de Goiás apresentam menor precipitação do que as bacias no sudoeste e noroeste goianos, no entanto, possuem maior desenvolvimento vegetativo durante mais tempo (meses de janeiro a maio).

As séries temporais demonstram similaridade entre os indicadores NDVI e NDWI (Figura 5.4), no entanto com algumas particularidades conforme a classe de uso do solo predominante. Na agricultura anual (Figura 5.4-a) o NDWI é um pouco maior que o NDVI, demonstrando a capacidade de retenção de água. No entanto, é importante considerar que essas regiões de predominância de agricultura anual apresentam maior investimento tecnológico no uso do solo, como também, faz uso de irrigação, aumentando relativamente o teor de água presente nas plantas. Nesse gráfico observam-se dois picos de menores valores do NDVI e NDWI, correspondentes ao período de fim da primeira safra e início da segunda safra (entre os meses de fevereiro e abril) e o período de fim da segunda safra e início da primeira safra (meses de agosto a outubro).

Na pastagem o NDVI mantém-se um pouco maior do que o NDWI, principalmente a partir de outubro em que os indicadores de vegetação respondem à

precipitação iniciada no mês de agosto. Isso se deve à menor infiltração e disponibilidade de água no solo da pastagem causada pelo pisoteio do gado e consequente compactação do solo (Pinheiro et al., 2009).

Já na bacia de predominância de vegetação natural (Figura 5.4-c) essa diferença é mais pronunciada, sendo o NDVI visivelmente maior do que o NDWI, como também o período de alto estresse hídrico (menor do que -2,0) dura mais tempo do que para outras classes, cerca de quatro meses (maio a setembro). As bacias com predominância de vegetação natural apresentam características que explicam essa diferença: a fitofisionomia predominante é Savana Arborizada com uma pequena parcela de Savana Parque, conforme classificação do Mapa de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado do PROBIO (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira) (Brasil, 2006; Brasil, 2007) e apresentam alta quantidade de folhas que respondem pelo NDVI; o solo é predominantemente degradado e montanhoso, apresentando índice médio baixo de qualidade de solo (1-3) (Baretto et al., 2010) e, devido a distribuição esparsa da vegetação em determinadas áreas existe solo exposto que é captado pelo NDWI; apresenta menor precipitação anual (1.100 a 1.300 mm) em relação ao restante da área de estudo (1300 a 1600 mm). Com efeito, essa vegetação natural sofre estresse hídrico por um período maior do que as bacias de pastagem e agricultura avaliadas. Para a bacia com predominância de “mistura” no uso do solo (Figura 5.4-d) observa-se um padrão de baixa precipitação, similar ao observado na vegetação natural (Figura 5.4-c), entretanto o NDVI e NDWI apresentam quase os mesmos valores.

Observa-se que em alguns meses do período de seca (maio a agosto) impacta nos meses futuros que vão apresentar os menores valores dos indicadores NDVI e NDWI (agosto a outubro). Ao comparar os gráficos, o NDVI mostra que o impacto é igual para a agricultura anual e pastagem, uma vez que apresentam mesmo comportamento, tendo mesmo valor de pico negativo (-2,0), porém, o NDWI mostra que o estresse hídrico da vegetação é maior na pastagem. Enquanto o NDWI da agricultura anual tem um comportamento de parábola (com concavidade voltada para baixo) na pastagem esse comportamento é de uma reta (decrescente e depois crescente), tendo o pico negativo no mês de outubro. Essa diferença é considerável para ser atribuída à pequena diferença de precipitação nos meses anteriores (junho a agosto). Assim, como afirmado por Gu et al. (2007) a queda mais acentuada nos valores de NDWI significa que, durante o período de seca, a vegetação do pasto teve maior perda de teor de água.

Ao analisar as séries temporais de precipitação percebe-se um relativo atraso em relação ao NDVI e NDWI. A partir da análise de correlação entre a precipitação e o NDVI e NDWI (Tabela 5.1) obtém-se que a maior correlação corresponde a dois meses futuros (Figura 5 a, b) tanto para o NDVI ($r > 0,84$) quanto para o NDWI ($r > 0,87$). Como verificado por Ávila et al. (2009) utilizando dados de precipitação de radar e estações meteorológicas, o NDVI mostra-se sensível a eventos de precipitação com uma defasagem de dois meses para cultura de cana-de-açúcar. Da mesma forma, Nicácio et al. (2009) encontraram resultados similares na análise da bacia hidrográfica do Rio Coxim, no estado de Mato Grosso do Sul. Assim, a superfície do solo não apresenta uma resposta rápida em relação à precipitação, no entanto, esse atraso em uma análise mensal é o mesmo para o NDVI e o NDWI. Isso demonstra que a vegetação necessita de um tempo para responder à variação da precipitação; a água leva um tempo para penetrar nas raízes, e a planta necessita de iluminação solar durante certo período de tempo para se desenvolver e isso se refletir na variação dos indicadores (Nicácio et al., 2009). Ao analisar a correlação entre o NDVI e NDWI em mesmo intervalo de tempo (Figura 5-c) observa-se alta correlação ($r > 0,94$) entre os indicadores. Porém, como o NDWI caracteriza melhor o teor de água na vegetação possui uma relação ligeiramente maior com a precipitação do que o NDVI (Tabela 5.2).

Na análise comparativa de imagens dos indicadores SPI, SVI e SWI (Figura 5.6) percebe-se diferença de precipitação entre os anos, sendo menor em 2014. Observa-se que essa diferença de precipitação afeta diretamente o desenvolvimento da vegetação neste ano, como pode ser visto em dois meses futuros do NDVI, e principalmente do NDWI, quando comparado com os outros anos (2013 e 2015), principalmente nas regiões central e sul do estado de Goiás. Particularmente, essas regiões se destacam pela produção agrícola e neste ano houve uma queda de produtividade agrícola devido baixa precipitação no período da primeira safra 2013/2014 constatado por organizações de produtores agrícolas (FAEG, 2014) e levantamento de safras no estado de Goiás (GOIÁS, 2017). Por exemplo, o cultivo de soja, maior área plantada e agricultura de primeira fase, apresentou um aumento de área plantada (7,78%) na safra 2013/2014, devido expectativas de alta produção alimentadas pelos resultados da safra anterior (2012/2013). Porém, devido a pouca chuva dos meses iniciais do ano de 2014, a safra 2013/2014 apresentou considerável queda de produtividade (-6,95%), quando comparado à primeira safra do ano de 2012/2013 (GOIÁS, 2017). Essas imagens

demonstram o potencial dos indicadores normalizados utilizados para comparação entre anos da sazonalidade da vegetação, no entanto, ainda pouco explorado.

As imagens resultantes dos cálculos de tendências (Figura 5.7) apresentam a sensibilidade dos índices NDWI e NDVI em perceber mudanças da vegetação da superfície, utilizando para isso os índices SWI e SVI, respectivamente. O SVI (Figura 7-b) apresenta tendência de diminuição do NDVI em toda área de estudo, porém em um intervalo de valores pequeno, não apresentando diferenciação entre os pixels. Por outro lado, o SWI (Figura 5.7-c) apresenta tendências tanto de aumento quanto diminuição do NDWI, demonstrando mais sensibilidade no tempo. Já em relação ao SPI (Figura 5.7-a), ocorre aumento no período em bacias ao extremo sudoeste do estado de Goiás e diminuição no restante da área de estudo, tendência que possivelmente está relacionada às diferenças climáticas da região sudoeste (clima tropical úmido) com o restante do estado de Goiás (clima tropical semiúmido).

Ao avaliar a tendência do SWI percebe-se que algumas bacias apresentam tendências positivas, na maioria, localizadas a nordeste e a oeste do estado de Goiás. As bacias que apresentam tendência positiva a nordeste, nos limites com o estado da Bahia, apresentam as mudanças de uso do solo, como o avanço da pastagem plantada e a intensificação produtiva em áreas de agricultura, devido avanço da área de influência do MATOPIBA¹¹ no estado de Goiás (Rudorff et al., 2015). Já a oeste, em que há predominância de uso do solo para pastagem, essa tendência positiva nas bacias hidrográficas pode representar menor estresse hídrico na pastagem devido melhoria do manejo da pastagem ou diminuição de cabeças de gado por área.

Essas análises da superfície do solo a partir de tendências de estresse hídrico demonstram o potencial do NDWI principalmente devido a maior sensibilidade que o NDVI na identificação de mudanças de uso e cobertura do solo, o que corrobora com a afirmação de Ezzine et al. (2014) que destacam o NDWI como um indicador relativamente novo, necessitando de maiores investigações para melhor compreensão de seu potencial e aplicabilidade.

5.6. Conclusão

Os indicadores obtidos a partir do MSG apresentam potencial para o estudo da sazonalidade nas bacias hidrográficas do estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal.

¹¹ MATOPIBA é o acrônimo para a região dos estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia que representa uma nova fronteira agrícola do Brasil (Embrapa, 2017).

Em uma análise de séries-temporais das classes de uso do solo predominantes é possível identificar particularidades intrínsecas do comportamento sazonal, como o desenvolvimento da vegetação devido precipitação, impacto do período de seca na vegetação, períodos de primeira e segunda safra na agricultura e o estresse hídrico da pastagem. Tanto o NDVI quanto o NDWI apresentam maior correlação com a precipitação de dois meses anteriores, e alta correlação entre si.

Com o uso dos indicadores normalizados SVI e SWI percebe-se que o NDWI apresenta maior sensibilidade do que o NDVI na identificação da sazonalidade da vegetação. Assim, o comportamento do NDWI (e SWI) demonstra seu potencial do indicador como relevante para ser utilizado em conjunto com o NDVI, para o monitoramento de diferentes classes de uso do solo.

A baixa resolução espacial dos indicadores provindos do Meteosat-10 não chega a representar uma limitação em análises de menor escala espacial, como em bacias hidrográficas, uma vez que é possível abstrair diversas informações da superfície. O estudo demonstra o potencial de indicadores de vegetação provindos de dados de satélite de órbita geoestacionária. Da mesma forma, fornece subsídios para estudar indicadores ambientais de superfície do solo provindos de dados do sensor ABI (*Advanced Baseline Imager*) da nova série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), satélite de órbita geoestacionária que apresenta como vantagens, em relação à série MSG, menor resolução espacial e menor ângulo de visada para o Brasil.

5.7. Referências

- ALBUQUERQUE, E. M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Sousa-PB. **Revista Estudos Geoambientais**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2014.
- ANA. Agência Nacional das Águas. Sistema de Informações Hidrológicas. **Regiões Hidrográficas do Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso: nov. 2017.
- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing* 5 (2), 949-981, 2013.
- ÁVILA, A. M. H.; GONÇALVES, R. R. V.; PINTO, H. S.; ZULLO, J. Relação entre a precipitação e o NDVI em imagens AVHRR/NOAA para a cana-de-açúcar no Estado de

São Paulo. In XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Natal, 2009. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.20/doc/553-560.pdf>>. Acesso: 06 nov. 2017. p. 553–60.

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 124, p. 377-387, 2016.

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; SILVA, L. R. M. Recent Trends in Vegetation Dynamics in the South America and Their Relationship to Rainfall. **Natural Hazards**, v. 77, n. 2, p. 883–99, 2015.

BARETTO, A.; SPAROVEK, G.; MAULE, R. Modelagem da aptidão do meio físico para culturas agrícolas. **Relatório Técnico**. USP/ESALQ. 2010. 29 p.

BRASIL. Banco Central do Brasil. **Sistema de Operações do Crédito Rural e do Proagro - SICOR**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/n/sicor>>. Acesso: nov. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento do Uso e Cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado**, 2015. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/>>. Acesso: mai. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. PROBIO. **Mapa de cobertura vegetal do bioma Cerrado**, 2006. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm?/cerrado>>. Acesso: nov. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. PROBIO. **Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado**. Relatório Final, 2007. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documents/relatorio_final.pdf>. Acesso: nov. 2017.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

CHEN, D.; HUANG, J.; JACKSON, T. J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 225–236, 2005.

CRACKNELL, A. P. Review article Synergy in remote sensing what's in a pixel ? International **Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2025–2047, 1998.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, B. B.; CHAVES, I. B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.539-548, 2012.

DE ALMEIDA, T. I. R.; PENATTI, N. C.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E.; DO AMARAL, C. H. Principal component analysis applied to a time series of MODIS images: the spatio-temporal variability of the Pantanal wetland, Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v. 1, p. 1-12, 2015.

EMBRAPA. Espaço temático: Matopiba. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-matopiba>>. Acesso: nov. 2017.

ELZINE, H.; BOUZIANE, A.; OUAZAR, D. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, n. 1, p. 36–48, 2014.

FAEG. 2014. **Efeitos da seca refletem na queda de produção em Goiás e no Brasil**. Disponível em: <<http://sistemafaeg.com.br/noticias/9372-efeitos-da-seca-refletem-na-queda-de-producao>>. Acesso: Nov. 2017.

FARIAS, S. E. M. Estimativas satelitárias de precipitação sobre o bioma cerrado: possibilidades e perspectivas. **Tese** (Tese em Ciências Ambientais). Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, 2016. 105 p.

FARIAS, S. E. M.; ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; SANO, E. E.; BARROS, J. R. 2013. Avaliação das estimativas de precipitação do satélite TRMM para o estado de Goiás: uma abordagem climatológica. In: ANAIS XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GHGD>>. Acesso: nov. 2017.

FENSHOLT R.; ANYAMBA A.; HUBER S.; PROUD S. R.; TUCKER C. J.; SMALL J.; et al. Analysing the advantages of high temporal resolution geostationary MSG SEVIRI data compared to Polar Operational Environmental Satellite data for land surface monitoring in Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 721–729, 2011.

FENSHOLT, R.; HUBER, S.; PROUD, S. R.; MBOW, C. Infrared Reflectance Data from Polar Orbiting and Geostationary Platforms. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, n. 3, p. 271–85, 2010.

- FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; STISEN, S.; e TUCKER, C. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. *Remote Sensing of Environment*, v. 101, p. 212–229, 2006.
- FRANÇA, H. **Os incêndios de 2010 nos parques nacionais do cerrado.** 2010. Disponível em: <<http://www.ufabc.edu.br/images/stories/comunicacao/queimadas-2010-1.pdf>>. Acesso: Nov. 2017.
- GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrogeográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO **Anais...** Goiânia, 2005. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/attachment.cgi/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.01.26/doc/2511.pdf>>. Acesso: nov. 2017.
- GAO, B. 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257–266.
- GOIÁS. Governo de Goiás. Secretaria de Desenvolvimento. **Levantamento de Safras.** 2017. Disponível em: <<http://www.sed.go.gov.br/post/ver/194220/levantamento-de-safras>>. Acesso: Nov. 2017.
- GONZAGA, E. P.; SANTOS, V. V.; NICÁCIO, R. M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. In XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Curitiba, 2011. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte/2011/07.04.12.48>>. Acesso: nov. 2017.
- GU, Y.; BROWN, J. F.; VERDIN, J. P.; WARDLOW, B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. L06407, p. 1–6, 2007.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa Clima Brasil.** 2002. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/clima.pdf>. Acesso: nov. 2017.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso: Nov. 2017.

- JOVANOVIC, N.; GARCIA, C. L. BUGAN, R. D. H.; Teich, I.; RODRIGUEZ, C. M. G. 2014. Validation of Remotely-Sensed Evapotranspiration and NDWI Using Ground Measurements at Riverlands, South Africa. **Water SA**, v. 40, n. 2, p. 211–20.
- LAPIG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. Mapa Interativo. **Áreas de queimadas do Brasil**. Disponível em: <<http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>>. Acesso: nov. 2017.
- MACHADO, T. S.; CAIONI, C.; FERNANDES, R. S. Análise de NDVI e NDWI em diferentes intensidades pluviométricas para bacia hidrográfica do rio do Cachoeirinha – Mato Grosso, Brasil. In: 5º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. **Anais...** Campo Grande, 2014. Disponível em: <<https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2014/cd/p108.pdf>>. Acesso: nov. 2017.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8TH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. **Procedings...** Anaheim, CA, 1993. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.4342&rep=rep1&type=pdf>> Acesso: Nov. 2017.
- OLIVEIRA, T. H.; MACHADO, C. C. C.; SILVA, J. S.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M.; SILVA, B. B. Índice de Umidade (NDWI) e Análise Espaço-Temporal do Albedo da Superfície da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, n. 2, p. 55–69, 2010.
- PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambi-Agua**, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008.
- RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. G. Analysis of Cerrado Physiognomies and Conversion in the MODIS Seasonal–Temporal Domain. **Earth Interactions**, v. 9, n. 3, p. 1–22, 2005.
- RUDORFF, B.; RISSO, J.; et al. 2015. **Análise Geoespacial da Dinâmica das Culturas Anuais no Bioma Cerrado: 2000 a 2014**. Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda. Disponível em: <http://biomas.agrosatelite.com.br/img/Analise_geoespacial_da_dinamica_das_culturas_anuais_no_bioma_Cerrado_2000a2014.pdf>. Acesso: nov. 2017.

- RULINDA C. M.; BIJKER W.; e STEIN A. Image mining for drought monitoring in eastern Africa using Meteosat SEVIRI data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12S, p. S63–S68, 2010.
- RULINDA C. M.; BIJKER W.; STEIN, A. The chlorophyll variability in Meteosat derived NDVI in a context of drought monitoring. **Procedia Environmental Sciences**, v. 3, p. 32–37, 2011.
- SARR, M. A.; LACAZE, B. Caractérisation de la dynamique de la végétation en Afrique de l'Ouest : comparaison des indices NDVI de MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR (exemple du Ferlo, Sénégal). In Texte issu d'une communication au colloque Météosat Seconde Génération : un nouvel outil de suiv., p. 1–10, 2008. Disponível em: <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260971>>. Acesso: out. 2017.
- SCHMETZ, J.; PILI, P.; TJEMKES, S.; JUST, D.; KERKMANN, J.; ROTA, S.; RATIER, A. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 7, p. 991–991, 2002.
- SILVA, D. C. C.; FILHO, J. L. A.; OLIVEIRA, R. A.; LOURENÇO, R. W. Aplicação do NDWI para avaliar a disponibilidade de água em bacias hidrográficas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 1, p. 774–783, 2017.
- SOBRINO, J. A.; JULIEN, Y.; SORIA, G. Phenology estimation from meteosat second generation data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1653–1659, 2013.
- TIAN, E.; FENSHOLT, R.; VERBESSELT, J. GROGAN, K.; HORION, S.; WANG, Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 163, p. 326-340, 2015.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment** v. 150, p. 127-150, 1979.
- VERMOTE, E. F.; TANR, D.; DEUZ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.-j. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum , 6S : An Overview. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675–686, 1997.
- WENG, Q.; FU, P.. Modeling annual parameters of clear-sky land surface temperature variations and evaluating the impact of cloud cover using time series of Landsat TIR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 267–278, 2014.
- YASSUDA, E. R.. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, v. 27, n. 2, 5–18, 1993.

Conclusões

A revisão da literatura permite concluir que a série MSG, em particular, o satélite Meteosat-10, permite a estimativa de uma ampla gama de parâmetros meteorológicos, bem como detecção e monitoramento de diversos processos superficiais, em particular, aqueles relacionados à dinâmica da cobertura e uso do solo. Além disso, os principais desafios para obtenção de indicadores biofísicos de vegetação a partir do Meteosat-10 estão relacionados à necessidade de correção geométrica e atmosférica. Porém, tais técnicas apresentam limitações em condições de alto ângulo de visada, como para o Brasil. Ademais a fusão de bandas mostrou-se uma alternativa viável para aumentar a resolução espacial do dado, porém, existem particularidades de diferenças de obtenção das imagens (pancromática e multiespectral) que precisam ser consideradas.

Com relação à primeira hipótese, o intervalo do dia que apresentou melhor resultado para obtenção de indicadores ambientais da superfície do solo, conforme critérios estabelecidos, foi das 10:00 h às 12:00 h. Sendo que o NDVI MSG mostrou-se capaz de obter uma imagem sobre o estado de Goiás com alta cobertura de pixels no intervalo de 12 dias, enquanto o MOD09 obtém no intervalo de 16 dias. Isso confirma que a maior resolução temporal permite obter maior amostragem para análises de séries-temporais, agregando mais informação às análises. Porém, a oportunidade de se ter uma imagem com alta cobertura em menor intervalo de dias é prejudicada devido a erros de comissão pelo produto máscara de nuvens, ocasionado pelo alto ângulo de visada, indicando, quando comparado ao produto MOD09, presença de nuvens quando não há nuvens.

Com relação à segunda hipótese, a correção geométrica e o uso da banda pancromática não apresentaram aumento da correlação com dados MODIS, não agregando melhorias aos resultados. Em análise visual das imagens obtidas com essas técnicas percebe-se que a correção geométrica mostra-se como um ajuste fino, mas que diminui a correlação com dados MODIS. Já a fusão de bandas, devido à diferença de intervalo de obtenção de imagens (pancromática e multiespectral), e alto ângulo de visada, apresenta ruídos consideráveis nas imagens que, consequentemente, diminuem a correlação com dados MODIS. Por outro lado, a correção atmosférica mantém a

correlação dos dados e aumenta o valor do NDVI, aproximando mais o valor do NDVI MSG dos produtos NDVI MODIS.

Com relação à terceira hipótese, analisando o NDVI e NDWI tendo como área de estudo bacias hidrográficas de Goiás, incluindo Distrito Federal, a baixa resolução espacial dos indicadores provindos do Meteosat-10 não chega a representar uma limitação, uma vez que é possível abstrair diversas informações da superfície do solo, como a sazonalidade de diferentes classes de uso do solo e influência de diferença de precipitação entre os anos avaliados. Em uma análise de tendências o NDWI apresenta maior sensibilidade nas mudanças de uso e cobertura do solo do que o NDVI. Tais resultados demonstram o potencial de indicadores biofísicos de vegetação provindos de dados de satélite de órbita geoestacionária.

Considerações finais

Esse trabalho encontrou diversos desafios para avaliação e obtenção do NDVI MSG, dentre os quais o entendimento e codificação de diferentes técnicas, utilização de diferentes fontes de dados auxiliares, vários *clusters* e recursos de armazenamento de dados. Isso envolveu, em números, mais de 2.000 horas de processamento e codificação, geração de 8.000 linhas de código Python, processamento de 300.000 arquivos e, ao todo, utilização de 6.000.000 MB de dados. Aparentemente, isso demonstra que o uso de dados de plataformas geoestacionárias é complexo. Da mesma forma, pode ser vista como um investimento de tempo e recursos desnecessário, uma vez que se têm produtos definidos pela comunidade científica com alta usabilidade e, além disso, com menor resolução espacial, como produtos MODIS.

Porém, o estudo demonstra que existe potencial relevante em dados de satélite de órbita geoestacionária para o monitoramento ambiental da superfície seja devido à alta resolução temporal, e consequente maior disponibilidade de cobertura da área de estudo livre de nuvens, seja devido à obtenção de indicadores ambientais (NDVI e NDWI) sensíveis à sazonalidade da superfície do solo mesmo em condições de alto ângulo visada.

Além disso, é perceptível um movimento global para ampliar e popularizar o uso de satélites de órbita geoestacionária, iniciado pela EUMETSAT (*European Organization for Meteorological Satellites*), exemplificado por ações como: criação de grupos de pesquisa temáticos e inter-institucionais; suporte técnico; diferentes formas para obtenção de dados e produtos; disponibilidade de aplicativos gratuitos para utilização e processamento dos dados; suporte e divulgação da plataforma. Tal movimento se mostra também na nova plataforma GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) apresentando uma estrutura (*software* e *hardware*) para recepção de dados robusta, disponibilizando software aplicativo gratuito e com alta usabilidade, fornecendo dados e suporte online, e que apresenta atualmente mais de 70 sistemas instalados nas Américas. Além disso, a GEO¹² (*Group on Earth Observations*)

¹² Organização intergovernamental que trabalha para melhorar a disponibilidade, acesso e uso das observações da Terra em benefício da sociedade. A GEO trabalha para melhorar e coordenar sistemas globais de observação da Terra e promover o compartilhamento de dados amplo e aberto.

através da GEONETCast¹³ estimula a integração de dados das novas séries de satélites de órbita geoestacionária GOES (Estados Unidos) e Himawari (Japão) que fazem uso do mesmo sensor, o ABI (*Advanced Baseline Imager*), juntamente com o Meteosat-10 com o intuito de fornecer uma visão completa da superfície da Terra.

Esse movimento global demonstra as grandes expectativas das organizações mundiais e diversos países com o ganho esperado em diversas áreas com o uso de dados das novas gerações de satélites de órbita geoestacionária. Com efeito, frente a esse movimento, mostra-se relevante um maior interesse de pesquisadores na investigação e utilização de dados de satélites de órbita geoestacionária para o monitoramento biofísico da superfície da Terra, uma vez que representa uma alternativa viável, com vantagens temporais, e maior suporte técnico e operacional do que há alguns anos.

¹³ Rede de sistemas de disseminação de informações por satélite, em tempo quase real, projetada para distribuir dados observados, da superfície, da atmosfera, metadados e produtos para diversos tipos de usuários.

Apêndices

Apêndice A: Material suplementar do capítulo 4

A.1 Diagrama ampliado

A Fig. A.1.1 apresenta um diagrama ampliado das imagens e tabelas de entrada e saída das operações de fusão de bandas (e suas etapas), correção atmosférica e geométrica. Para a fusão de bandas são apresentados os dados envolvidos para cada uma das etapas do processo.

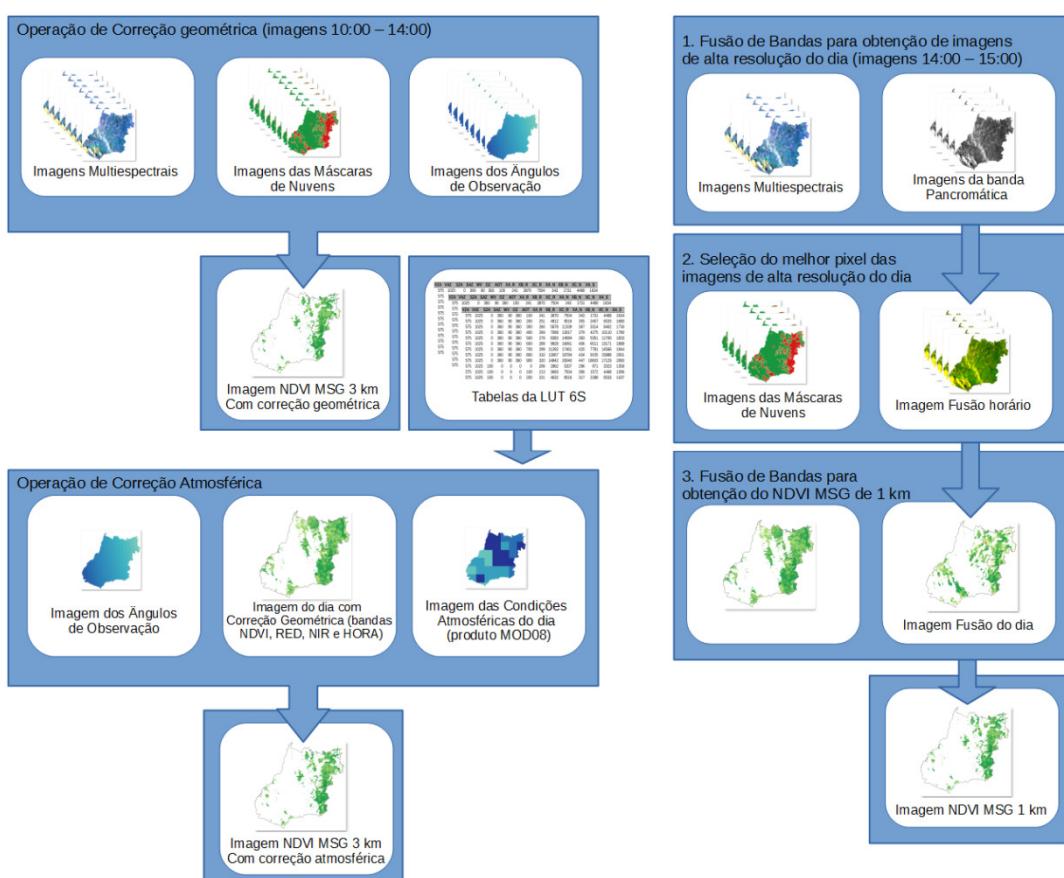


Figura A1.1 Diagrama ampliado das imagens e tabelas de entrada e saída das operações de fusão de bandas (e suas etapas), correção atmosférica e geométrica

A.2 Técnicas de fusão de bandas

Para cada imagem obtida na janela temporal da banda pancromática realiza-se a operação de Fusão de Bandas com objetivo de obter as bandas RED e NIR com resolução espacial de 1 km. O processo é composto de três etapas, conforme descrito no corpo do texto. A seguir na Fig. A.2.1 apresenta-se a ilustração da etapa 1 do processo

de fusão de bandas para um determinado pixel utilizando a técnica LMVM (*Local Mean and Variance Matching*).

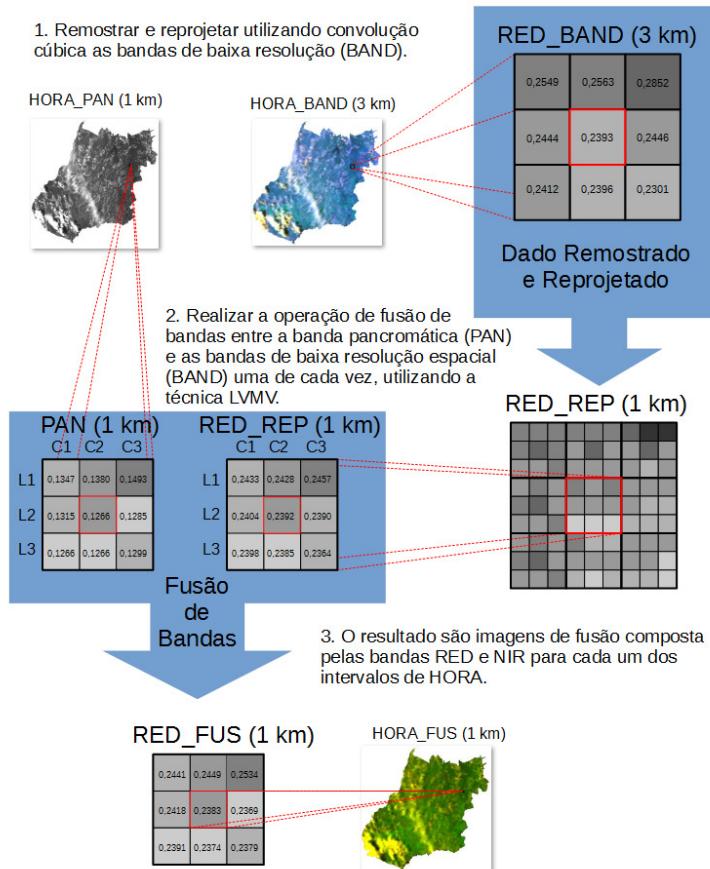


Figura A.2.1. Diagrama da aplicação da técnica de fusão de bandas LMVM (*Local Mean and Variance Matching*) para obtenção das bandas multiespectrais fundidas.

Onde HORA_PAN a imagem pancromática, HORA_BAND a imagem de baixa resolução contendo as bandas RED e NIR e HORA_FUS a imagem resultante da fusão de bandas, onde HORA corresponde ao horário de obtenção da imagem, conforme a janela temporal utilizada (14:00 h às 15:00 h ou 14:00 h às 16:00 h). RED_BAND é a banda RED com resolução espacial de 3 km, RED_REP é a banda RED reprojetada, utilizando convolução cúbica, e reamostrada para resolução espacial de 1 km e RED_FUS a banda RED resultante da operação de fusão de bandas, com resolução espacial de 1 km.

Para melhor compreensão do cálculo executado pelo algoritmo LMVM, pegou-se um recorte de 3 x 3 pixels de 1 km das bandas pancromática (PAN) e RED reprojetado (RED_REP) de mesmo horário e mesma posição. Onde L1, L2 e L3 são as linhas e C1, C2 e C3 as colunas da matriz. O algoritmo da técnica LMVM é apresentado na equação a seguir.

$$F_{(i,j)} = \frac{H_{(i,j)} - \bar{H}_{(i,j)} \times S(L)_{(i,j)(w,h)}}{s(H)_{(i,j)(w,h)}} + \bar{L}_{(i,j)(w,h)} \quad (\text{A.2.1})$$

Onde $F(i, j)$ é o pixel fundido de coordenadas (i, j) , $H_{(i,j)}$ e $L_{(i,j)}$ são respectivamente as imagens de alta e baixa resolução espacial do pixel de coordenada (i, j) , $\bar{H}_{(i,j)(w,h)}$ e $\bar{L}_{(i,j)(w,h)}$ são as médias locais calculada dentro da janela de altura h e largura w , $s(H)_{(i,j)(w,h)}$ e $s(L)_{(i,j)(w,h)}$ o desvio padrão local da banda da alta e baixa resolução, respectivamente.

Para a etapa 3 utilizou-se a técnica HPF (*High Pass Filter*) é uma técnica de fusão de bandas que funciona como um filtro passa alta, onde o termo alta se refere à informação da banda de alta resolução espacial, conforme descrito na equação a seguir.

$$F_{(i,j)} = L_{(i,j)} + (L_{(i,j)} - \bar{L}_{(i,j)}) \quad (\text{A.2.2})$$

Onde $F(i, j)$ é o pixel da fusão de coordenadas $(i; j)$, $H(i, j)$ e $L(i, j)$ são respectivamente as imagens de alta e baixa resolução espacial do pixel de coordenada $(i; j)$, $H(i; j)(w;h)$ e a média local da banda de alta resolução espacial, calculada dentro da janela de altura h e largura w . Essa técnica é interessante na fusão de bandas que não possuem alta correlação, como em situações que as imagens são de diferentes sensores ou foram obtidas em horários distintos (de Béthune et al., 1997). Particularmente, devido a diferença de intervalo de tempo para obtenção do NDVI_BAND, o NDVI obtido das 10:00 h às 12:00 h com bandas multiespectrais e NDVI_FUS, o NDVI resultante da fusão de bandas das 14:00 h às 15:00 h ou 14:00 h às 16:00 h, as imagens apresentam cobertura de nuvens distintas. Dessa forma, as técnicas LMVM e HPF podem apresentar, após a fusão de bandas, valor resultante para um pixel onde não havia informação em alguma das imagens, o que aumenta o ruído da imagem como um todo.

Para tanto se propôs a técnica HPF modificado, que é similar à técnica HPF, diferenciando-se em duas características:

Considera a média local como a média dos pixels de alta resolução da imagem NDVI_FUS que fazem parte do pixel de baixa resolução da imagem NDVI_BAND, ou seja, a média local será igual à média de valores dos nove pixels da imagem NDVI_FUS (1 km) com localização geográfica igual ao pixel de baixa resolução NDVI_BAND (3 km) antes da reprojeção;

Os pixels de mesma localização geográfica e com valor nulo não foram processados, sendo o resultado desta fusão também nulo. Dessa forma, a imagem

resultante desta fusão representa apenas os pixels com valor não nulo presentes nas duas imagens envolvidas do processo (NDVI_BAND e NDVI_FUS).

A Fig. A.2.2 apresenta a análise de diferentes técnicas (LMVM, HPF e HPF modificado) para fusão de bandas entre o NDVI com resolução espacial de 3 km (NDVI_BAND) e o NDVI resultante do processo de fusão da banda pancromática com resolução espacial de 1 km (NDVI_FUS). As técnicas LMVM e HPF apresentam resultados com ruídos nas bordas internas da imagem (em vermelho) e preenchimento onde falta informação da banda de alta resolução (como visto na área da elipse azul, dentro da área destacada de cada uma das imagens). Já a técnica HPF modificado apresenta valor no pixel apenas quando há valores não nulos no mesmo pixel das duas imagens de entrada para fusão de bandas.

A Fig. A.2.3 apresenta uma ilustração da técnica HPF modificado e a sequência de ações para a fusão de bandas entre NDVI_FUS, a imagem do NDVI com 1 km de resolução resultante da fusão da banda pancromática, e NDVI_BAND, resultante do processo de correção geométrica e atmosférica.

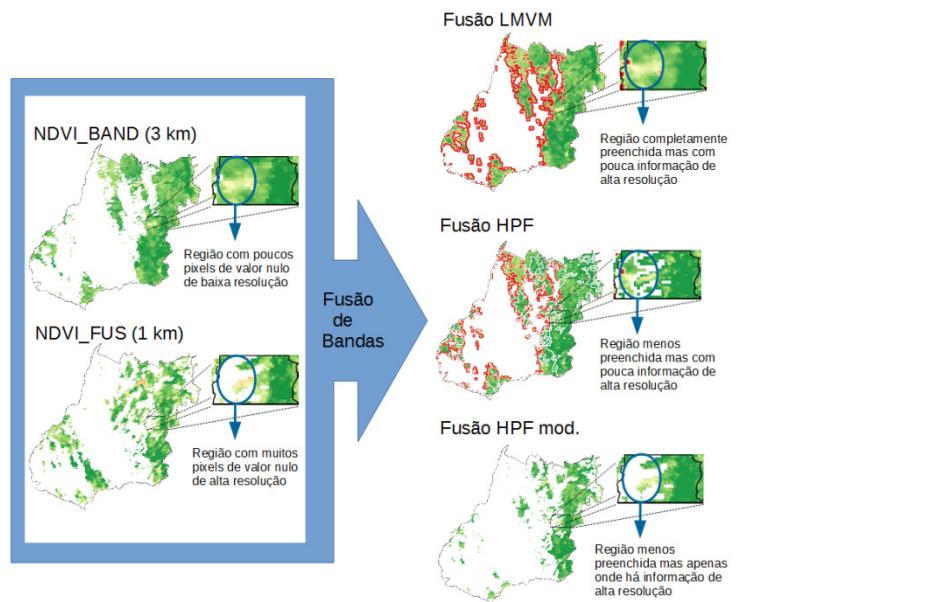


Figura A.2.2. Exemplo de influência das nuvens e operação de diferentes técnicas de fusão de bandas utilizando bases de dados em diferentes intervalos de tempo.

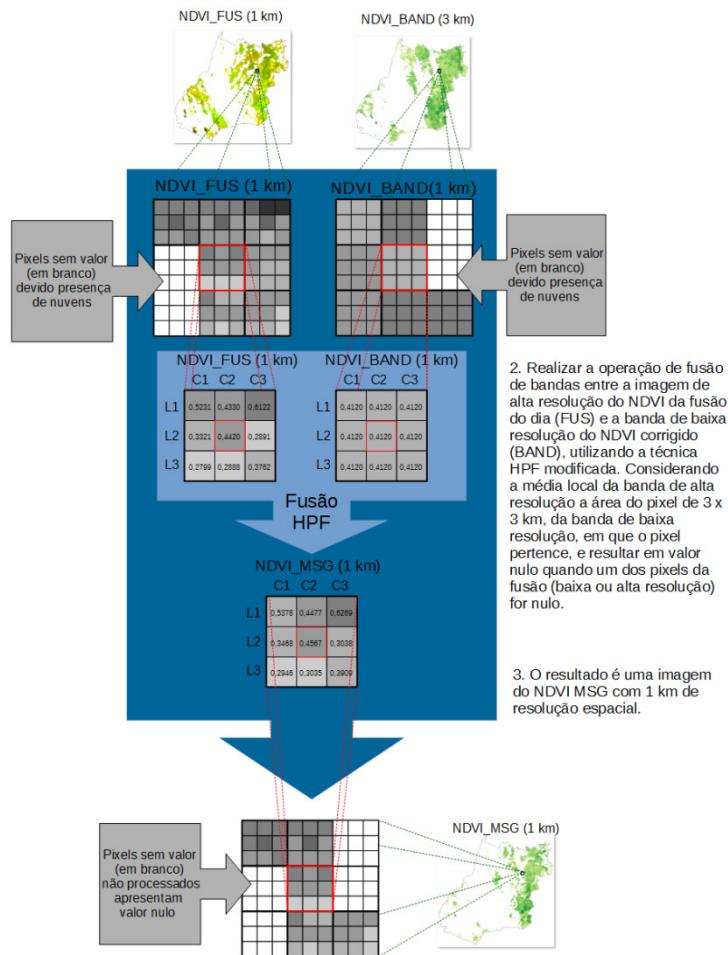


Figura A.2.3. Diagrama da aplicação da técnica de fusão de bandas HPF para obtenção do NDVI MSG.

A.3 Correção geométrica

A Fig. A.3.1 apresenta a metodologia para processamento da correção geométrica BRDF das bandas RED e NIR do MSG, baseado em n amostras de reflectância e ângulos de observação, para geração do NDVI máximo, proveniente de uma amostra m. A metodologia apresenta os seguintes passos:

1. Inicialmente organizam-se os dados na matriz de BRDF e faz-se o cálculo dos coeficientes de BRDF das n amostras para as bandas RED e NIR. O processo tem como entrada a reflectância medida e os ângulos de observação de cada uma das n amostras sem cobertura de nuvens e como saídas os coeficientes que caracterizam a cobertura vegetal do pixel das bandas RED e NIR;
2. Calcula-se a reflectância RED e NIR com correção de BRDF para as n amostras, tendo como entrada os coeficientes das bandas RED e NIR, resultado da etapa anterior, e os ângulos de observação de cada uma das amostras;

3. Por último, seleciona-se a amostra m , dentre as n amostras, que fornece o maior valor de NDVI, para tanto utiliza como entrada as reflectâncias corrigidas das bandas RED e NIR de cada amostra. Os valores de reflectância das bandas e ângulos de observação desta amostra são armazenados, pois serão posteriormente utilizados para cálculo da correção atmosférica.

1. Cálculo dos coeficientes de BRDF de n amostras para as bandas RED e NIR:

$$\begin{array}{c}
 \text{Entradas: Ângulos de observação de } n \text{ amostras} \\
 \downarrow \\
 \left[\begin{array}{ccc}
 K_{iso}^1 & K_{geo}(\theta_i^1, \theta_v^1, \varphi^1) & K_{vol}(\theta_i^1, \theta_v^1, \varphi^1) \\
 K_{iso}^2 & K_{geo}(\theta_i^2, \theta_v^2, \varphi^2) & K_{vol}(\theta_i^2, \theta_v^2, \varphi^2) \\
 K_{iso}^3 & K_{geo}(\theta_i^3, \theta_v^3, \varphi^3) & K_{vol}(\theta_i^3, \theta_v^3, \varphi^3) \\
 K_{iso}^4 & K_{geo}(\theta_i^4, \theta_v^4, \varphi^4) & K_{vol}(\theta_i^4, \theta_v^4, \varphi^4) \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 K_{iso}^n & K_{geo}(\theta_i^n, \theta_v^n, \varphi^n) & K_{vol}(\theta_i^n, \theta_v^n, \varphi^n)
 \end{array} \right] \times \\
 \text{Entradas: Reflectância de } n \text{ amostras} \\
 \downarrow \\
 \text{Saídas:} \quad \left[\begin{array}{c}
 f_{iso} \\
 f_{geo} \\
 f_{vol}
 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c}
 \rho^1 \\
 \rho^2 \\
 \rho^3 \\
 \rho^4 \\
 \vdots \\
 \rho^n
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

2. Cálculo da reflectância RED e NIR com correção de BRDF para as n amostras:

$$\begin{array}{c}
 \text{Entradas: Ângulos de observação da amostra} \\
 \downarrow \\
 \text{Saída:} \quad \rho(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{iso}(\lambda)K_{iso} + f_{geo}K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{vol}K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi)
 \end{array}$$

3. Cálculo do NDVI máximo, proveniente de uma amostra m:

$$NDVI_{MAX} = \frac{\rho_{NIR}(\theta_i^m, \theta_v^m, \varphi^m) - \rho_{RED}(\theta_i^m, \theta_v^m, \varphi^m)}{\rho_{NIR}(\theta_i^m, \theta_v^m, \varphi^m) + \rho_{RED}(\theta_i^m, \theta_v^m, \varphi^m)}$$

Figura A.3.1. Diagrama da metodologia de processamento da correção geométrica do BRDF das bandas RED e NIR do MSG, baseado em n amostras de reflectância e ângulos de observação, para geração do NDVI máximo, proveniente de uma amostra m .

Onde K_{iso} , K_{geo} , K_{vol} correspondem aos núcleos de correção isométrica, geométrica e volumétrica. As entradas, para cada pixel, são compostas por θ_{in} , θ_{vn} os ângulos zenitais de iluminação e visada da amostra n , respectivamente, φ a diferença entre os ângulos azimutais de iluminação e visada, ρ_n a reflectância da amostra n . A matriz inversa tem como saída f_{iso} , f_{geo} e f_{vol} a proporção da reflexão isométrica, geométrica e volumétrica desse pixel. Com os parâmetros de saída pode-se então calcular a reflectância geometricamente corrigida de cada amostra. Sendo selecionado o NDVI de valor máximo para representar a reflectância do dia.

Para a definição da técnica de correção geométrica a ser utilizada foram selecionados 20 pixels em grandes áreas da área de estudo (estado de Goiás incluindo o

Distrito Federal), sendo 10 amostras classificadas como agricultura anual e 10 como, conforme classificação do mapa Terraclass 2013 (Brasil, 2015). A Fig. A.3.2 apresenta a distribuição dos pixels de amostra na área de estudo. Para o estudo foi utilizada a série temporal do ano de 2013.

O NDVI MSG corrigido foi comparado ao NDVI do produto MOD13 (Solano et al., 2010). Para isso o pixel MOD13Q1 foi degradado para uma resolução espacial de 3 km e reamostrado, utilizando operação de convolução cúbica. Para a comparação foi escolhida a amostra do MSG com DOY (*day of year*) mais próximo no tempo da amostra do produto MOD13Q1, utilizando para isso a banda *day_of_the_year* que contém o DOY de amostragem de cada pixel do produto, sendo considerado uma diferença máxima de 6 dias. Assim, para cada ponto amostral selecionado foram usadas 23 amostras de NDVI MOD13Q1 e MSG com resolução espacial de 3 km.

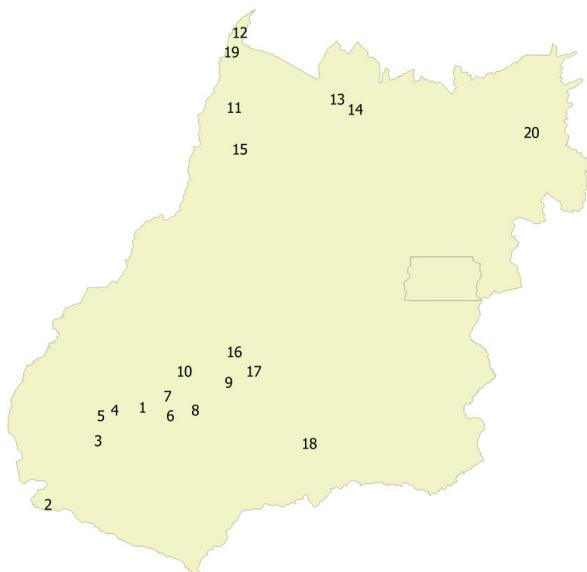


Figura A.3.2. Ilustração da distribuição dos pixels da área de estudo (estado de Goiás incluindo o Distrito Federal). São grandes áreas de classes de agricultura anual (1-10) e pastagem (11-20), conforme classificação do Mapa Terraclass 2013 (Brasil, 2015).

Para implementação do BRDF foram avaliados diferentes técnicas com o intuito de selecionar aquela que apresentasse maior correlação com dados MODIS, sendo avaliado: a) a combinação de várias técnicas de núcleos geométricos (Sparse, Dense e Roujean) e volumétricos (Thin e Thick) para representação da função BRDF, conforme apresentados por Roujean et al. (1992) e Warner et al. (1995). Também foram avaliadas técnicas que visam melhorar a qualidade do resultado do cálculo do BRDF de núcleos dirigidos, particularmente BRDF com Convergência de Pesos e com Reflectância Ajustada. A convergência de pesos é um algoritmo que visa eliminar erros de inversão numérica variando o valor do peso de cada observação conforme o desvio

do valor do NDVI da observação em relação à média de todas as observações (Gao et al., 2002). Já a reflectância ajustada fornece mais peso às observações que apresentam menores ângulos zenitais de visada e iluminação (Proud et al., 2014). Essas duas técnicas foram aplicadas aos núcleos dirigidos que apresentaram os melhores resultados.

A Tab. A.3.1 apresenta os resultados da análise estatística.

Tabela A.3.1. Resultados estatísticos da comparação de diferentes técnicas de correção geométrica com o produto MOD13. Sendo μ a média, σ o desvio padrão, df o grau de liberdade, p o teste de significância e r o coeficiente de correlação, em negrito os maiores valores de correlação.

Técnica de correção geométrica utilizada	Pastagem (df = 224, p < 0,001)			Agricultura anual (df = 228, p < 0,001)		
	μ	σ	r	μ	σ	r
NDVI MOD13	0,5384	0,1755		0,5542	0,2574	
Ross-Thick Li-Dense	0,4556	0,1152	0,7119	0,4568	0,1730	0,6612
Ross-Thin Li-Dense	0,4553	0,1161	0,7007	0,4578	0,1735	0,6569
Ross-Thick Roujean	0,4543	0,1165	0,6980	0,4567	0,1739	0,6547
Roujean Ross-Thin	0,4544	0,1165	0,6977	0,4571	0,1736	0,6550
Ross-Thick Li-Sparce	0,4551	0,1149	0,7118	0,4567	0,1732	0,6619
Ross-Thin Li-Sparce	0,4550	0,1158	0,7029	0,4577	0,1735	0,6565
Convergência Pesos aplicada ao Ross-Thick Li-Sparce	0,4545	0,1152	0,7107	0,4549	0,1730	0,6591
Reflectância Ajustada aplicada ao Ross-Thick Li-Sparce	0,4557	0,1152	0,7118	0,4570	0,1732	0,6609

De modo geral, para a correção geométrica as maiores correlações foram obtidas pela combinação dos núcleos *Ross-Thick Li-Sparce* e *Ross-Thick Li-Dense*, destacados na Tabela A.2.1 em negrito. Por apresentar os melhores resultados, de modo geral, foi selecionada a técnica *Ross-Thick Li-Sparce* para ser utilizada no processamento de correção geométrica do produto NDVI MSG. Essa mesma técnica similar é utilizada no algoritmo do produto Albedo MODIS (Wanner et al., 1995; Schaaf et al., 2002).

A.4 Look-up Table 6S

Para realizar a correção atmosférica inicialmente foi necessário identificar os intervalos para representação dos valores de cada uma das variáveis de entrada da LUT, conforme características de observação e condições atmosféricas para a área de estudo no período de 2013 a 2015. A Fig. A.4.1 apresenta os histogramas das variáveis de entrada da LUT relacionadas aos ângulos de observação e visada (à esquerda) e parâmetros atmosféricos (à direita).

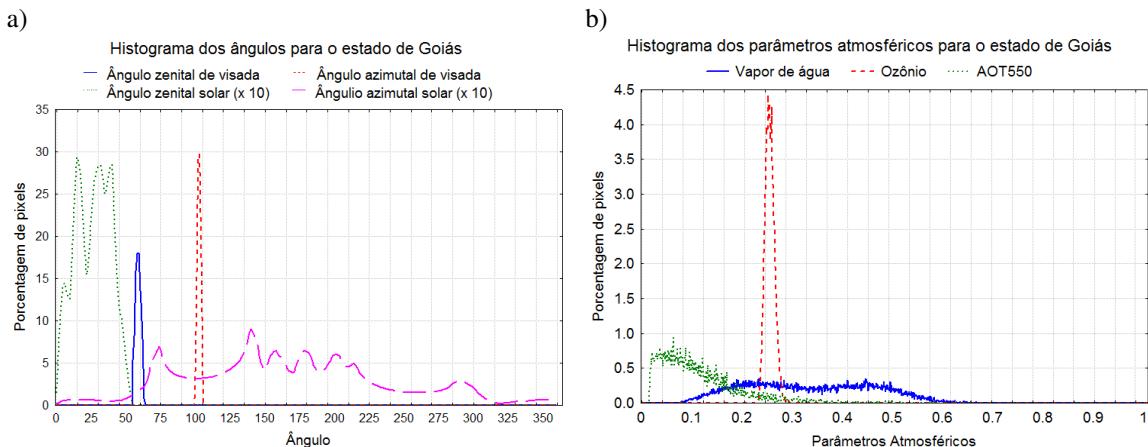


Figura A.4.1. Histogramas das variáveis de entrada da LUT (Look-up Table) da correção atmosférica 6S: ângulos de observação e visada (a) e parâmetros atmosféricos (b).

A partir dos histogramas de cada variável foram definidos então os valores (máximo, mínimo e intervalo) das variáveis de entrada da LUT, conforme apresentado na Tab. A.4.1. Destaca-se que a diminuição do tamanho dos intervalos melhora a qualidade dos resultados, principalmente para as variáveis de condições atmosféricas (vapor de água, ozônio e AOT), porém, ocasiona um aumento exponencial na quantidade de amostras da tabela e tempo de processamento, sendo necessário avaliar a relação custo (tempo de processamento) e benefício (maior precisão).

Tabela A.4.1. Conjunto de variáveis entrada e intervalos de valores para a LUT (Look-Up Table) para correção atmosférica utilizando o algoritmo 6S.

Parâmetro de entrada	Mínimo	Máximo	Intervalo
Ângulo zenithal de visada (grau)	55	65	2,5
Ângulo azimuthal de visada (grau)	100	110	2,5
Ângulo zenithal solar (grau)	0	60	10
Ângulo azimuthal solar (grau)	0	360	60
Vapor de água (g/cm^2)	0	0,9	0,1
Ozônio (cm-atm)	0	0,36	0,6
AOT	0	0,8	0,1

A Tab. A.4.2 apresenta uma amostra dos parâmetros da LUT 6S. Os valores são armazenados como inteiros com o intuito de aumentar a velocidade de processamento (leitura das tabelas e cálculos), tendo cada parâmetro de entrada ou saída um valor multiplicador. Os parâmetros de entrada são os ângulos zenithal e azimuthal de visada (respectivamente VZA e VAZ), os ângulos zenithal e azimuthal solar (respectivamente SZA e SAZ), e os parâmetros ambientais vapor de água (WV), ozônio (OZ) e aerosol troposférico de comprimento de onda 550 nm (AOT). Os parâmetros de saída são três (XA, XB, XC) para cada banda multiespectral utilizada, sendo RED (XA_R, XB_R e XC_R), NIR (XA_N, XB_N e XC_N) e SWIR (XA_S, XB_S, XC_S). Os valores possuem multiplicadores para que se possa obter a tabela com valores inteiros, sendo os

valores dos multiplicadores: 10 para os parâmetros VZA, VAZ SZA, SAZ e WV; 1000 para OZ e AOT e 100.000 para os parâmetros de saída.

Tabela A.4.2. Amostra dos parâmetros da LUT 6S. Os parâmetros de entrada são os ângulos zenital e azimuthal de visada (respectivamente VZA e VAZ), os ângulos zenital e azimuthal solar (respectivamente SZA e SAZ), e os parâmetros ambientais vapor de água (WV), ozônio (OZ) e aerossol troposférico de comprimento de onda 550 nm (AOT). Sendo os parâmetros de saída três (XA, XB, XC) para cada banda multiespectral utilizada, sendo RED (XA_R, XB_R e XC_R), NIR (XA_N, XB_N e XC_N) e SWIR (XA_S, XB_S, XC_S).

VZA	VAZ	SZA	SAZ	WV	OZ	AOT	XA_R	XB_R	XC_R	XA_N	XB_N	XC_N	XA_S	XB_S	XC_S
625	1000	0	0	0	0	204	3191	5207	293	1083	2023	1340	62	125	
625	1000	0	0	0	0	100	213	4160	7504	305	1782	4468	1387	470	2184
625	1000	0	0	0	0	200	222	5278	9516	317	2621	6533	1435	963	3868
625	1000	0	0	0	0	300	232	6542	11339	331	3612	8402	1486	1537	5362
625	1000	0	0	0	0	400	241	7944	13017	344	4722	10110	1539	2186	6722
625	1000	0	0	0	0	500	252	9486	14584	358	5962	11700	1593	2908	7979
625	1000	0	0	0	0	600	262	11169	16061	372	7294	13171	1649	3700	9152
625	1000	0	0	0	0	700	272	12972	17461	386	8740	14566	1705	4559	10254
625	1000	0	0	0	0	800	283	14893	18784	400	10298	15888	1764	5482	11296

Os parâmetros de saída da LUT 6S, juntamente com a radiância da banda multiespectral, são utilizados para calcular a reflectância, a partir das seguintes equações (Vermote e Vermeulen, 1999):

$$y = xa \times L - xb \quad (\text{A.4.1})$$

$$acr = \frac{y}{1+xc \times y} \quad (\text{A.4.2})$$

Onde xa , xb , xc são os parâmetros de saída da LUT 6S para da banda multiespectral, L é a radiância medida pelo sensor do topo da atmosfera, acr a reflectância da superfície corrigida.

A.5 Resultados da técnica de componentes principais

Os gráficos a seguir apresentam características relacionadas ao NDVI MSG e NDVI MOD13 utilizados na etapa de aplicação do NDVI MSG (etapa 2.6). As Figuras A.5.1 e A.5.2 apresentam, respectivamente, a média mensal e variância dos produtos para a área de estudo, obtida a partir de dados do período de 2013 a 2015. Observa-se que a média em si se equivalem, sendo relativamente distintas apenas nos meses 3 e 4, possivelmente representando o período de senescênciam da vegetação agrícola que afeta o valor do NDVI MSG de forma mais sensível do que para o MOD13. Já a variância dos produtos seguem padrões relativamente parecidos, porém a variância do MOD13 é consideravelmente maior do que para o MSG.

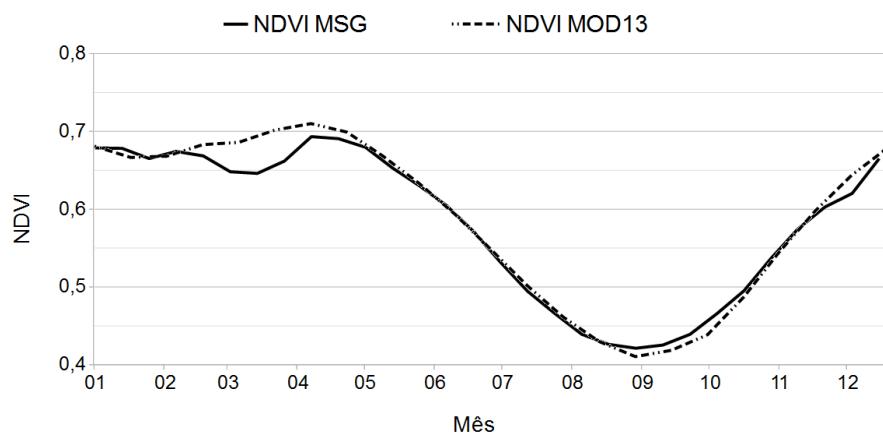


Figura A.5.1 Média mensal do NDVI MSG e NDVI MOD13 para a área de estudo, período 2013 a 2015.

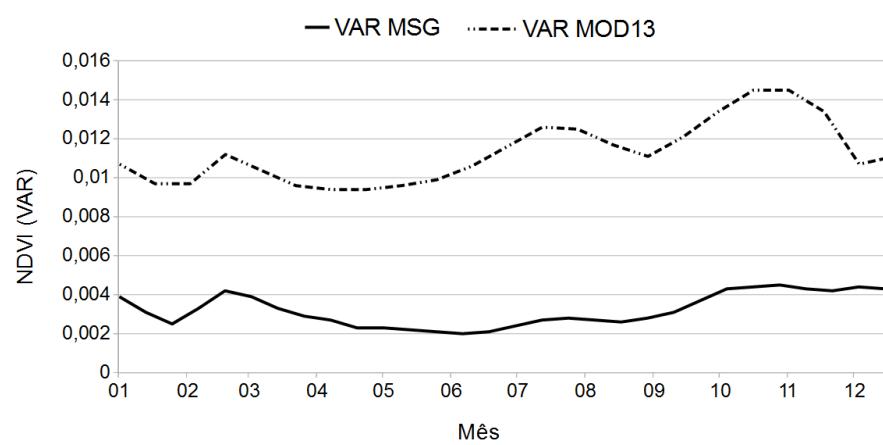


Figura A.5.2 Variância mensal do NDVI MSG e NDVI MOD13 para a área de estudo, período 2013 a 2015.

Apêndice B: Tutorial sistema Geonetcast

O objetivo deste apêndice é apresentar os principais passos para instalação, configuração e utilização do sistema Geonetcast. A Figura B.1.1 apresenta os componentes da plataforma descrevendo suas funções principais. O sistema é composto de *hardware* (antena, cabos, conexões, placa receptora e CPU) e *software* (Technisat e Fazzt).

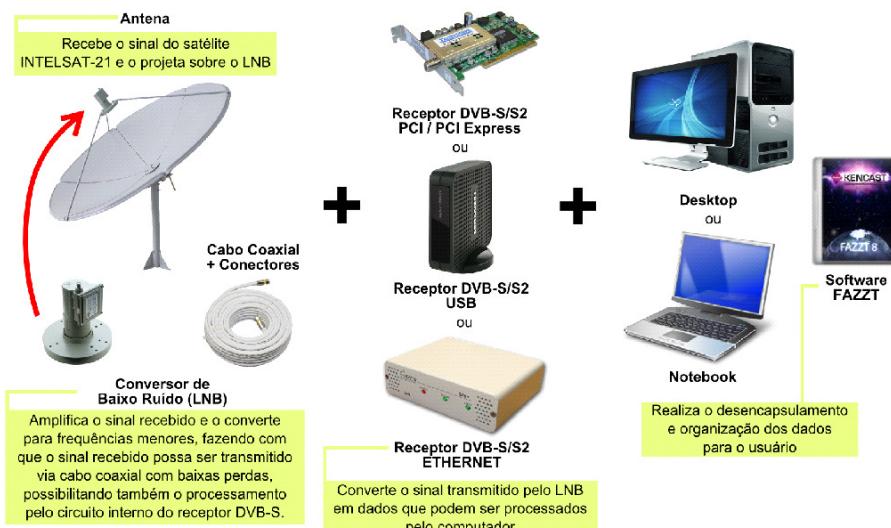


Figura B.1.1. Componentes da plataforma Geonetcast. Fonte: CPTEC/INPE.

B.1 Instalação da plataforma de hardware

A instalação da antena, LNB (*Low Noise Block*), cabos e conexões foram revisados por um especialista em instalação de antenas. Para melhorar o desempenho do sistema todo cabeamento foi substituído, sem uso de emendas. A antena foi posicionada para recepção de sinais do satélite geoestacionário Intelsat-21 (58 W) cujos parâmetros de configuração podem ser obtidos a partir de equipamentos específicos ou em sites de internet, conforme ilustrado na Figura B.1.2. O posicionamento sem um equipamento específico pode demandar tempo e resultar em imprecisão e, consequentemente, menor qualidade de sinal. Uma bússola pode ser influenciada pela antena, sendo inútil para um ajuste fino. Após o posicionamento da antena percebeu-se que o LNB estava com baixo ganho de recepção, sendo então substituído por um novo componente, que resultou em melhoria no sinal de recepção.

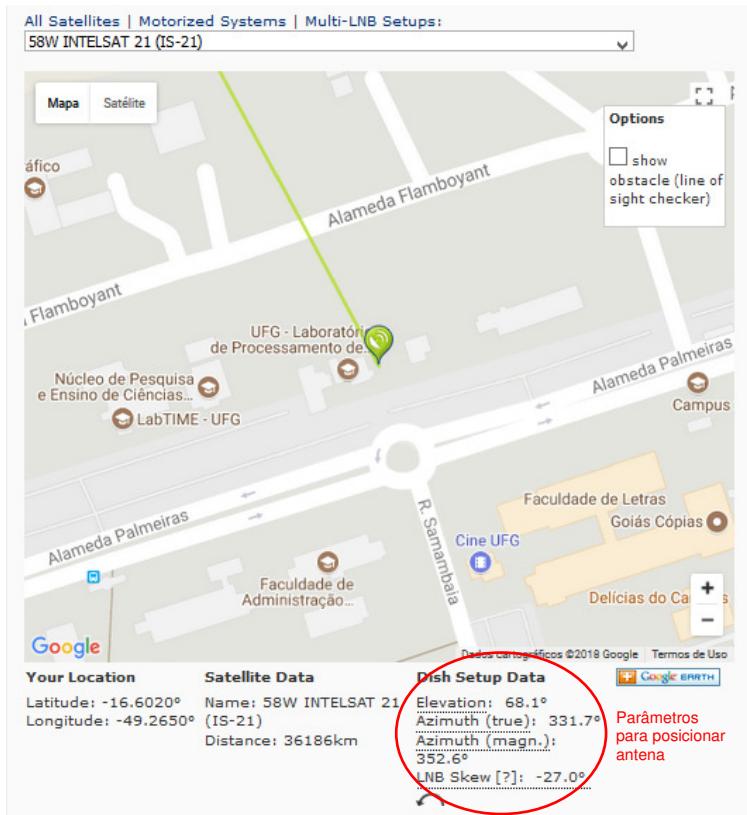


Figura B.1.1. Variáveis para posicionamento da antena de recepção do sistema GEONETCAST conforme localização da estação. Fonte: <http://www.dishpointer.com/>.

B.2 Instalação da plataforma de software

Inicialmente fez-se a instalação da placa Technisat para recepção do sinal da antena. Essa placa foi anteriormente utilizada no sistema de recepção Eumetsat. A placa possui *driver* para o Windows 7 e anteriores, bem como plataformas Linux. O sistema operacional utilizado foi o Windows 7. Existem algumas recomendações sugeridas para aumentar a desempenho de recepção da placa no Windows 7, no entanto, foram seguidas apenas algumas, uma vez que poderiam limitar o uso do computador em rede. A seguir são descritos os passos para instalação e configuração do software Technisat.

Inicialmente instala-se a placa no computador, bem como o *driver* recomendado (*Skystar_4_6_0*). Em seguida instala-se o *software Technisat DVD-PC TV Star Setup*. Após a instalação é necessário reiniciar o computador para que o software identifique a placa receptora. O ícone aparece na aba de ferramentas, próximo ao relógio como um satélite dentro de um círculo verde ou vermelho. Clique neste ícone com o botão direito e selecione a opção *Setup4PC*. Caso ao reiniciar o computador apareça um erro é porque não conseguiu abrir o *Setup4PC* na inicialização. Porém, é só abrir o programa indo a **Menu Iniciar → Todos os Programas → Technisat DVB → Setup4PC**.

Para configurar o software abra o *Setup4PC*, selecione a aba ***Satellite Settings***, e adicione o ***Intelsat-21***, clicando no botão ***Add*** (Figura B.2.1-a). Na nova guia, entre com os valores: LOF1: **5150 MHz**; Switch: **0**; LOF2: será preenchida automaticamente após o preenchimento da switch como 0; DiSEqC: **None** (Figura B.2.1-b). Em seguida pressione ***OK***.

O passo seguinte é configurar o transponder. Pressione o botão ***Transponder Management*** e preencha os campos: Start Frequency: **3840 MHz**; End Frequency: **3840 MHz**; Step Size: **5 MHz**; Symbol Rate 1: **27690 kS/s**; Symbol Rate 2 e 3: não precisam ser preenchidos (Figura B.2.1-c). Pressione o botão ***Search&Scan*** para sintonia automática do Transponder (Figura B.2.1-d).

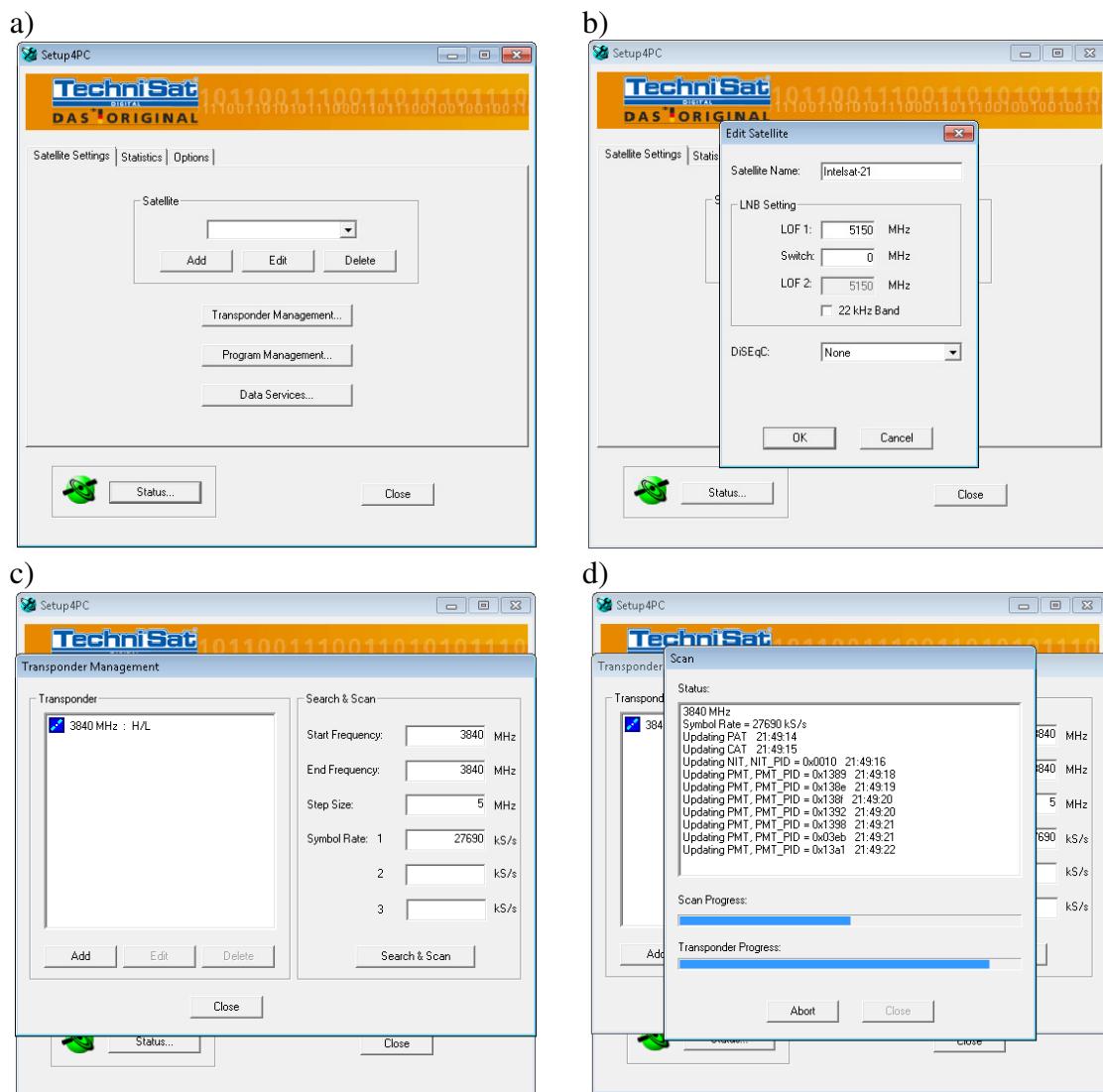


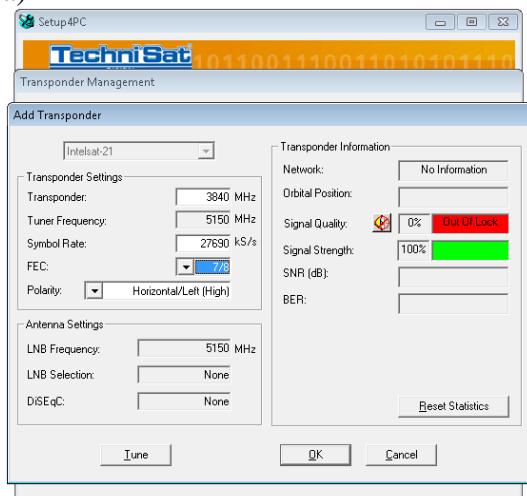
Figura B.2.1. Configurações iniciais do software Technisat.

Após finalizar a sintonia feche a guia e, de volta à ***Transponder Management***, pressione o botão ***Add*** para visualizar a nova guia. Preencha os campos de ***Transponder Settings*** como indicado (Figura B.2.2-a) e após o preenchimento pressione o botão

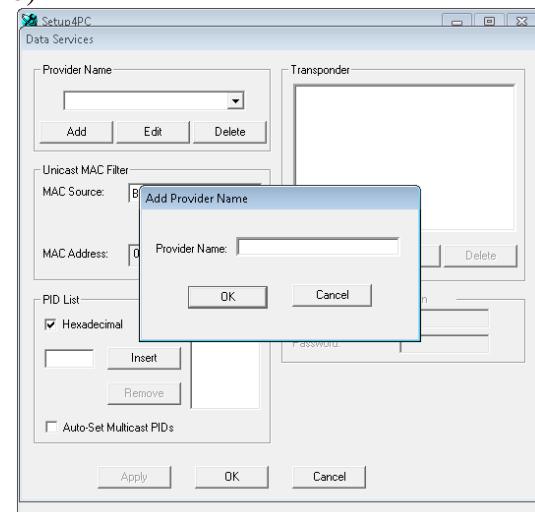
Tune para o preenchimento automático do campo **Tuner Frequency** com o valor 1310. O campo **Polarity** deveria ser configurado como **Vertical/Right (Low)**, porém, como o LNB foi instalado em posição invertida, usou-se a configuração **Horizontal/Left (High)**. Feito isto, feche a guia clicando em **OK**.

Com isso, estará de volta na tela inicial do Setup4PC. Em seguida clique em **Data Service** para abrir uma nova tela (Figura B.2.2-b). No campo **Provider Name**, pressione em **Add** para editar o nome do serviço, entre com o nome de sua preferência (foi utilizado GEONETCAST) e finalize com **OK**. Ainda na guia **Data Services**, no quadro **Transponder**, clique em **Add** para determinar qual Transponder receberá o sinal do GEONETCast (Figura B.2.2-c). Selecione no campo dropdown da guia **Add Transponder** a opção **3840 MHz: V/R**; No campo **Name**, entre com o nome do satélite, neste caso **Intelsat-21**; Marque a opção **Initial Locking Transponder** para a placa DBV ficar sempre sintonizada no canal do GEONETCAST. Finalize clicando em **OK** e de volta à guia **Data Services**, já é possível visualizar a frequência do transponder (Figura B.2.2-d). Continuando em **Data Services**, preencha os campos (Figura B.2.2-d): **MAC Source: Broadband Receiver**; **PID List:** marque a opção **Hexadecimal**; no campo em branco preencha com o valor **1069**; pressione **Insert** para adicionar o PID do satélite. (visualizado como 0x1069). Finalize a configuração clicando em **Apply**.

a)



b)



c)

d)

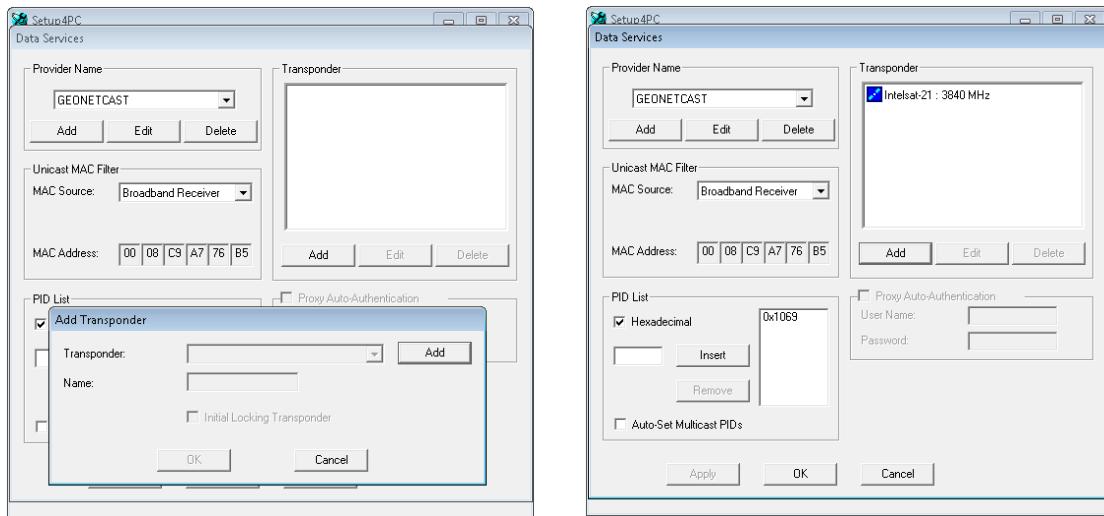


Figura B.2.2. Configurações do Transponder do software Technisat.

De volta à tela inicial do Setup4PC, click em *Status* para checar a recepção de dados. Caso você visualize algo parecido como a tela abaixo, parabéns, sua configuração foi bem sucedida! Verifique as informações da tela:

- Neste campo deve estar selecionado *Current Settings* ou *Intelsat-21*, caso negativo, abra o dropdown e selecione a opção Intelsat-21. (Caso você não visualize a opção do Intelsat-21, significa que a configuração não foi bem sucedida);
- Confirme os valores destes campos conforme a figura;
- Nestes campos voce pode confirmar o uplinker do sinal e a posição do Intelsat-21;
- Caso a antena esteja bem apontada para o satélite, melhor será a qualidade e a potência do sinal;
- Quanto maior for o valor da relação sinal/ruído, melhor será a qualidade do sinal;
- Esta taxa de erro de bits pode ser considerada o fator mais importante na recepção de dados, quanto menor o valor, melhor.

Percebe-se que a recepção dos dados está normal e de boa qualidade devido as barras verdes. Caso o sinal do satélite esteja fraco na antena, esta barra tende para o amarelo, e torna-se vermelha com a perda do sinal. O sinal resultante foi melhor do que o esperado devido ter refeito todo o cabeamento, substituir o LNB (Greatek C Band Monoblock) e, principalmente, pela maior dimensão da antena (BakofSat 2,6 m), comparado à dimensão sugerida para a plataforma (1,5 m). O sinal de recepção no

LAPIG é muito bom, sendo melhor do que obtido com antenas de 1,5 m e receptor DVB-S USB na sede do CPTEC/INPE.

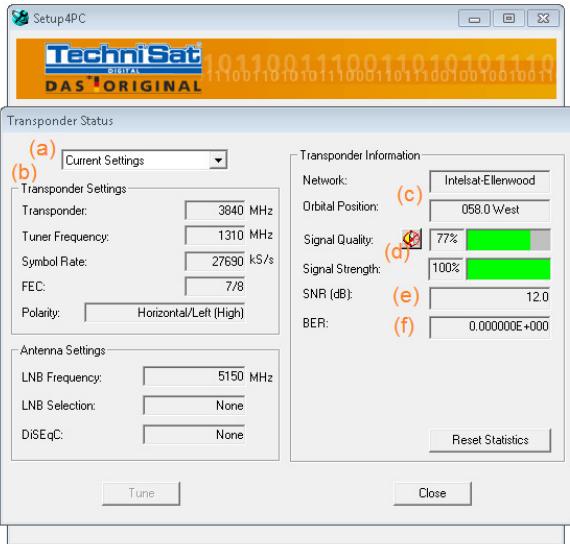


Figura B.2.3. Estado da recepção de dados pela placa Technisat PCI.

B.3 Configuração de recepção de arquivos

O software Fazzt realiza a recepção e organização dos arquivos. Os arquivos necessários estão no CD de instalação, a chave foi recebida via e-mail, sendo todos esses arquivos disponíveis em backup no LAPIG. A instalação é bem simples, no entanto, é necessário suprir o requisito de instalação do banco de dados **SQL Express** (disponível em `\fazzt\3rdParty\SQLExpress`). Após a instalação do banco de dados reinicie o computador. Posteriormente instale a versão **FazztProfessionalClient** (disponível em `\fazzt\Windows\FazztProfessionalClient`). Durante o processo de instalação será solicitada a chave da licença do software, que deve ser inserida (arquivo com nome `PC173072.KCL`). Será necessário reiniciar o computador para que o programa crie as pastas e arquivos para iniciar o funcionamento, bem como o **Fazzt** possa configurar o banco de dados utilizado. Feito isso aparecerá um ícone em formato de antena de satélite (cor roxa) próximo ao relógio. Vá ao ícone e clique com o botão direito em **Admin (WWW)**. Caso não abra uma página do navegador de Internet é porque houve algum problema na instalação do banco de dados. No nosso caso, houve necessidade de, após a instalação do banco de dados, atualizar o banco de dados. Porém pode ocorrer alguma falha no processo de instalação que pode ser sanada reinstalando o banco de dados. A seguir são descritos os passos para a configuração do software Fazzt.

A tela **Admin** abre mostrando as informações de versão do software (**Fazzt Professional Client**), os arquivos que estão sendo recebidos no momento (**Current**

Transport Statistics) e dados sobre os arquivos recebidos nas últimas 24 horas (**Incoming Files**) (Figura B.3.1-a). Para visualizar os canais configurados para recepção de dados clique em **Configuration** e, em seguida, em **Channels** (Figura B.3.1-b). Observam-se na coluna **Status** os canais ativos (**1. Main, 103. Trainig, 107. Info & Admin**, etc). O canal **Main** não pode ser desabilitado, caso ocorra todos os canais deixarão de ser recebidos! É importante deixar ativo apenas os canais que serão utilizados uma vez que podem demandar espaço considerável sem necessidade.

Para configurar a pasta onde o **Fazzt** irá organizar as pastas de recepção vá em **Configuration** e, em seguida **Receive Settings** e na aba superior dessa página clique na opção **Virtual Paths**. A opção “****” representa o caminho no computador para salvar dados (caminho padrão **c:\Program Files (x86)\KenCast\Fazt\incoming**), sendo possível inserir um novo caminho de rede quando se deseja armazenar uma grande quantidade de dados (Figura B.3.1-c). Para visualizar a série histórica de arquivos recebidos pode-se ir na barra principal em **Logs** e, em seguida, em **Received Files** (Figura B.3.1-d).

Log Time	Transmission ID	Name
21/01/2018 11:28:27	279405187	W_XK-EUMTSAT-Darmstadt,SOONJONG+SATELLITE,MET09B+ATOVS,C_EIMP_20180121122416_27729_1249-449E-9813-6705262292,_tsuid
21/01/2018 11:28:30	544643005	ascat_20180121_120000_metopb_27729_eprs_o_caa_owr_i2_buf_E800DA87-76C2-4
21/01/2018 11:28:37	2480040279	S-DSL-FRA---OOS-EU_SST_FIELD-2018012110002.nc.B95C8EDC-B4D6-4BC5-1
21/01/2018 11:28:41	220986177	ascat_20180121_121200_metopb_27729_opt_o_250_i2_buf_80A83530-4C4A-4C0E-09
21/01/2018 11:28:44	205309171	8C0A95791B5C_iuid
21/01/2018 11:28:14	3383672322	S-DSL-FRA---MTO-MGSST_FIELD-2018012112102.nc.343ED40A-77CB-4A04-9C25-
21/01/2018 11:28:14	21605998C46_iuid	ascat_20180121_120900_metopb_27729_eprs_o_250_i2_buf_942966E5-6AFF-4A1E-8b
21/01/2018 11:28:23	256472220	W_XK-EUMTSAT-Darmstadt,SOONJONG+SATELLITE,MET09B+ATOVS,C_EIMP_20180121122117_27729_134B-48B0-8257-00004520675_iuid
21/01/2018 11:28:23	4112122212	ascat_20180121_120000_metopb_27729_eprs_o_caa_owr_i2_buf_EECF044-58D7-4
21/01/2018 11:28:25	2604808295	9A0C78E888AB-8000-4000-8000-000000000000_iuid
21/01/2018 11:28:25	9644A3A0E86DF_iuid	ascat_20180121_115900_metopb_27729_eprs_o_caa_owr_i2_buf_B9703056-814C-4
21/01/2018 11:28:25	274665233	S-DSL-FRA---MTO-MGSST_FIELD-2018012112027.nc.0605511C-D487-4063-977C-1

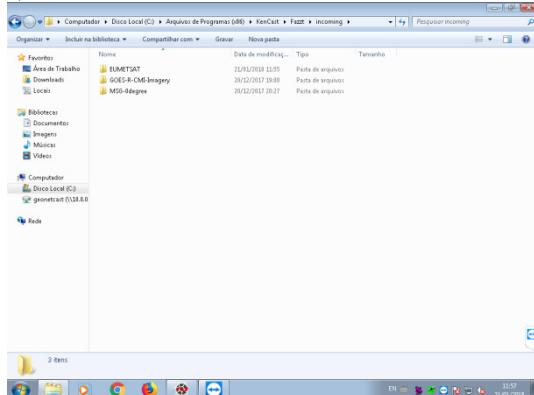
Figura B.3.1. Configurações do software Fazzt.

O software apresenta diversas outras funcionalidades e configurações sendo interessante uma leitura mais detalhada dos documentos encontrados em **Documentation**, como **Admin Guide, FAQ e Tutorials**.

As pastas dos canais configurados para recepção e os arquivos recebidos podem ser vistos na pasta de recepção configurada (caminho padrão **c:\Program Files**

(x86)\KenCast\Fazt\incoming\), conforme apresentado na Figura B.3.2. Porém pode-se configurar para gravação dos dados em uma partição específica com maior capacidade.

a)



b)

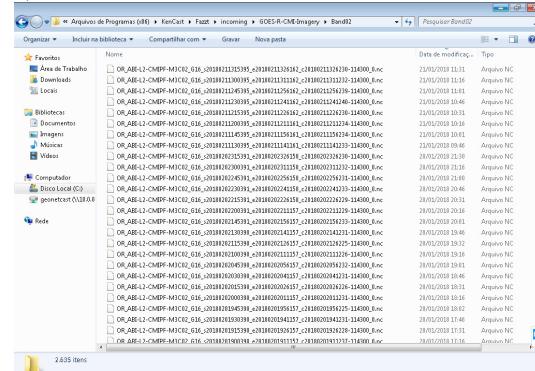


Figura B.3.2. Pastas dos canais pela plataforma Geonetcast (a) e arquivos recebidos do satélite GOES-R banda 2 (b).

B.4 Script para obtenção do NDVI MSG e RED GOES-16

Como exemplo foram gerados dois *scripts* para obtenção de imagens a partir de dados obtidos pelo sistema Geonetcast, sendo o NDVI MSG diário e a banda RED do GOES-16. Para o processamento de imagens do MSG foi utilizado como referência o script do Geonetcast *toolbox*¹⁴, essa biblioteca possui diversas opções para processamento de arquivos de imagens MSG obtidos pelo sistema anterior, o Eumetsat, atualmente Geonetcast. Essa biblioteca deve ser inserida na pasta de instalação do ILWIS¹⁵ (*The Integrated Land and Water Information System*) que é um software gratuito para sensoriamento remoto. Para o *script* de imagens GOES-16 foi utilizado como referência *scripts* disponíveis no blog da Geonetcast Americas¹⁶ que apresentam detalhes de posição do satélite e limites das imagens. Esse blog é uma referência para desenvolvedores que fazem uso de dados do sistema Geonetcast.

Será necessário instalar o software Osgeo4W¹⁷ que contém a biblioteca GDAL atualizada. Foi utilizado o Python 3.4, e foram utilizadas as seguintes bibliotecas: *numpy* (>= 1.9.2), *schedule* (0.5.0), *GDAL* (1.11.1), *DateTime* (4.2). A unidade de rede onde estão armazenados os arquivos do sistema Geonetcast (\10.0.0.26) é representada no script por um drive (z:). Os *scripts* fazem uso de uma sequência de comandos da biblioteca GDAL com os parâmetros de configuração.

¹⁴ Biblioteca disponível em <https://www.itc.nl/Pub/WRS/WRS-GEONETCast/GEONETCast-toolbox.html>

¹⁵ ILWIS disponível em <https://52north.org/software/software-projects/ilwis/>

¹⁶ Blog Geonetcast Americas, disponível em <https://geonetcast.wordpress.com/>

¹⁷ OSGEO4W disponível em <https://trac.osgeo.org/osgeo4w/>

Os dois *scripts* a seguir seguem a mesma lógica de operação. Inicialmente verificam se existem arquivos novos a serem gerados e, em seguida, gera os novos arquivos. Posteriormente aguarda determinado horário, que corresponde a um tempo depois da recepção do dado pelo sistema Geonetcast, para verificar se existem novos arquivos a serem processados. Esses *scripts* estão instalados no computador de recepção de dados do sistema Geonetcast e rodam indefinidamente. Caso ocorra algum problema no processo é registrado no arquivo de *log* para verificação futura. O recorte espacial foi realizado para o Brasil. O quadro B.4.1 apresenta o script para obtenção do NDVI MSG diário e o quadro B.4.2 apresenta o script para obtenção da banda RED do GOES-16. O produto NDVI MSG será disponibilizado no sítio do LAPIG¹⁸, conforme apresentado na Figura B.3.3.

Quadro B.4.1. Script para obtenção do NDVI MSG diário com recorte espacial para o Brasil.

```

import sys
import subprocess
import os
import glob
import datetime
import subprocess
import numpy
import time
from datetime import datetime
from threading import Timer
import schedule
from time import strftime, localtime, sleep

# Constantes
fileBrasil = os.getcwd() + '\\shapes\\pa_br_bioma_5000_2004_IBGE.shp'
fileGoias = os.getcwd() + '\\shapes\\limite_go_df_WGS84.shp'
fileMask = fileBrasil

logfile = os.getcwd() + '\\logs\\logfile.log'
exeDir = 'C:\\Python34\\Lib\\site-packages\\osgeo\\'
utilDir = 'C:\\ILWIS38\\Extensions\\GEONETCast-Toolbox\\util\\'
tmpDir = 'c:\\tmp\\'
osgeoDir = 'c:\\osgeo4w\\bin\\'
inputDir = 'Z:\\receive\\MSG-0degree\\MetProducts\\'
outputDir = 'Z:\\product\\MSG\\NDVI\\'

def delFile(file):
    # Busca e apaga arquivos selecionados
    for x in glob.glob(file):
        try:
            os.remove(x)
        except:
            print('Error in del file: %s' % str(glob.glob(file)))

def printlog(text):
    # Salva texto no arquivo log
    timeFile = strftime("%Y%m%d", localtime())
    time = strftime("%Y/%m/%d-%H:%M:%S", localtime())
    logFile = open(logfile, "a+")
    #print(logFile)
    logFile.write(str(text) + '\n')
    logFile.close()

def generateNDVI(tmpDir, inputDir, outputDir, filename, date):
    # Gera o arquivo NDVI
    printlog('Generate NDVI of: %s' % (date))

```

¹⁸ Sítio do LAPIG: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>

```

delFile(tmpDir + '*' + date + '*')
tmpfile1 = filename[filename.index('L-000'):] + '.xyz'
tmpfile2 = tmpDir + date + '_tmp2.hdf'
tmpfile3 = tmpDir + date + '_tmp3.tif'
tmpfile4 = tmpDir + date + '_tmp4.tif'
tmpfile5 = tmpDir + date + '_tmp5.tif'
tmpfile6 = tmpDir + date + '_tmp6.tif'
tmpfile7 = tmpDir + date + '_tmp7.tif'
outputfile = outputDir + date + '_NDVI.tif'
# Junta dados dos arquivos (PRO e 000001)
print(utilDir + 'joinmsg.exe ' + filename + ' ' + tmpDir)
subprocess.call(utilDir + 'joinmsg.exe ' + filename + ' ' + tmpDir)
# Renomeia arquivo hdf
print('rename' + ' ' + tmpDir + tmpfile1 + ' ' + tmpfile2)
os.rename(tmpDir + tmpfile1, tmpfile2)
# Copia apenas a banda do NDVI max
print(exeDir + 'gdal_translate.exe HDF5:' + tmpfile2 + '::/NDVImax ' + tmpfile3)
subprocess.call(exeDir + 'gdal_translate.exe HDF5:' + tmpfile2 + '::/NDVImax ' +
tmpfile3)
# Traduz imagem para coordenadas latitude e longitude
print(exeDir + 'gdal_translate -a_srs "+proj=geos +a=6378169 +b=6356583.8 +lon_0=0
+h=35785831" -a_ullr -5568000 5568000 5568000 -5568000 ' + tmpfile3 + ' ' + tmpfile4)
subprocess.call(exeDir + 'gdal_translate -a_srs "+proj=geos +a=6378169
+b=6356583.8 +lon_0=0 +h=35785831" -a_ullr -5568000 5568000 5568000 -5568000 ' +
tmpfile3 + ' ' + tmpfile4)
# Reprojeta imagem para WGS84
print(exeDir + 'gdalwarp.exe -srcnodata 255 -s_srs "+proj=geos +h=35785831
+a=6378169 +b=6356583.8" -t_srs "+proj=latlong +datum=WGS84" ' + tmpfile4 + ' ' +
tmpfile5)
subprocess.call(exeDir + 'gdalwarp.exe -srcnodata 255 -s_srs "+proj=geos
+h=35785831 +a=6378169 +b=6356583.8" -t_srs "+proj=latlong +datum=WGS84" ' + tmpfile4 +
' ' + tmpfile5)
# Converte para escala [0 1]
print('c:\python34\python ' + osgeoDir + 'gdal_calc.py -A ' + tmpfile5 + ' --
outfile=' + tmpfile6 + ' --type=Float32 --calc="0.01*A*(A<255)" --NoDataValue=0')
subprocess.call('c:\python34\python ' + osgeoDir + 'gdal_calc.py -A ' + tmpfile5 +
' --outfile=' + tmpfile6 + ' --type=Float32 --calc="0.01*A*(A<255)" --NoDataValue=0')
print(exeDir + 'gdal_translate.exe -projwin -73.991975 5.273674 -28.836741 -
33.7498845 -of GTiff ' + tmpfile6 + ' ' + tmpfile7)
subprocess.call(exeDir + 'gdal_translate.exe -projwin -73.991975 5.273674 -
28.836741 -33.7498845 -of GTiff ' + tmpfile6 + ' ' + tmpfile7)
# Recorta para o Brasil
print(exeDir + 'gdalwarp.exe -cutline ' + fileMask + ' ' + tmpfile7 + ' ' +
outfile)
subprocess.call(exeDir + 'gdalwarp.exe -cutline ' + fileMask + ' ' + tmpfile7 + ' +
outfile)
# Remove arquivos temporarios
delFile(tmpDir + '*' + date + '*')
return True

def verifyGenerateFiles():
    printlog('Verifica arquivos a serem gerados')
    files = glob.glob(inputDir + '*L-000-MSG3__-MPEF_____--NDVI_____-000001____-*')
    if(len(files) == 0):
        print('Erro. Não há arquivos em ' + inputDir + file)
        sys.exit()
    print('Verificando arquivos lidos')
    for filename in files:
        print(filename)
        id_date = filename.index('-201')
        date = filename[id_date+1:id_date+9]
        if(not os.path.isfile(outputDir + date + '_NDVI.tif')):
            print('Gerando arquivo : %s'%date)
            if(not generateNDVI(tmpDir, inputDir, outputDir, filename, date)):
                printlog('Erro em verifyGenerateFiles [tmpDir: %s, inputDir: %s,
filename: %s, date: %s]'%(tmpDir, inputDir, outputDir, filename, date))
            return
    class main:
        print('... Verificando arquivos atuais')
        verifyGenerateFiles()
        schedule.every().day.at("23:00").do(verifyGenerateFiles)
        print('... Esperando novos arquivos')
        while True:
            schedule.run_pending()
            time.sleep(60)

```

Quadro B.4.2. Script para obtenção da banda RED do GOES-16 com recorte espacial para o Brasil.

```

import sys
import subprocess
import os
import glob
import datetime
import subprocess
import numpy
import time
from datetime import datetime
from threading import Timer
import schedule
from time import strftime, localtime, sleep

# Constantes
fileBrasil = os.getcwd() + '\\\\shapes\\\\pa_br_bioma_5000_2004_IBGE.shp'
fileGoias = os.getcwd() + '\\\\shapes\\\\limite_go_df_WGS84.shp'
fileMask = fileBrasil

logfile = os.getcwd() + '\\\\logs\\\\logfile_goes.log'
exeDir = 'C:\\\\Python34\\\\Lib\\\\site-packages\\\\osgeo\\\\'
utilDir = 'C:\\\\ILWIS38\\\\Extensions\\\\GEONETCast-Toolbox\\\\util\\\\'
tmpDir = 'c:\\\\tmp\\\\'
osgeoDir = 'c:\\\\osgeo4w\\\\bin\\\\'
outputDir = 'z:\\\\product\\\\GOES\\\\RED\\\\'
inputDir = 'z:\\\\receive\\\\GOES-R-CMI-Imagery\\\\Band02\\\\'

def delFile(file):
    # Busca e apaga arquivos selecionados
    for x in glob.glob(file):
        try:
            os.remove(x)
        except:
            print('Error in del file: %s' % str(glob.glob(file)))

def printlog(text):
    # Escreve no arquivo de log
    timeFile = strftime("%Y%m%d", localtime())
    time = strftime("%Y/%m/%d-%H:%M:%S", localtime())
    logFile = open(logfile, "a+")
    logFile.write(str(text) + '\n')
    logFile.close()

def generateGOES(tmpDir, inputDir, outputDir, filename, date):
    # Gera novos arquivos
    printlog('Generate GOES Band02: %s' % (date))
    delFile(tmpDir + '*' + date + '*')
    tmpfile1 = tmpDir + date + '_tmp1.tif'
    tmpfile2 = tmpDir + date + '_tmp2.tif'
    tmpfile3 = tmpDir + date + '_tmp3.tif'
    tmpfile4 = tmpDir + date + '_tmp4.tif'
    outputfile = outputDir + date + '_GOES_RED.tif'
    # Copia apenas a banda do NDVI max
    print(exeDir + 'gdal_translate.exe HDF5:' + filename + '://CMI ' + tmpfile1)
    subprocess.call(exeDir + 'gdal_translate.exe HDF5:' + filename + '://CMI ' +
    tmpfile1)
    # Traduz imagem para coordenadas latitude e longitude
    print(exeDir + 'gdal_translate -a_srs "+proj=geos +h=35786023.0 +a=6378137.0
+b=6356752.31414 +f=0.00335281068119356027489803406172 +lat_0=0.0 +lon_0=-75 +sweep=x
+no_defs" -a_ullr -5434894.885056 5434894.885056 5434894.885056 -5434894.885056 ' +
tmpfile1 + ' ' + tmpfile2)
    subprocess.call(exeDir + 'gdal_translate -a_srs "+proj=geos +h=35786023.0
+a=6378137.0 +b=6356752.31414 +f=0.00335281068119356027489803406172 +lat_0=0.0 +lon_0=-75
+sweep=x +no_defs" -a_ullr -5434894.885056 5434894.885056 5434894.885056 -5434894.885056 ' -
5434894.885056 ' + tmpfile1 + ' ' + tmpfile2)
    # Reprojeta imagem para WGS84
    print(osgeoDir + 'gdalwarp.exe -s_srs "+proj=geos +h=35786023.0 +a=6378137.0
+b=6356752.31414 +f=0.00335281068119356027489803406172 +lat_0=0.0 +lon_0=-75 +sweep=x
+no_defs" -t_srs "+proj=latlong +datum=WGS84" ' + tmpfile2 + ' ' + tmpfile3)
    subprocess.call(osgeoDir + 'gdalwarp.exe -s_srs "+proj=geos +h=35786023.0
+a=6378137.0 +b=6356752.31414 +f=0.00335281068119356027489803406172 +lat_0=0.0 +lon_0=-75
+sweep=x +no_defs" -t_srs "+proj=latlong +datum=WGS84" ' + tmpfile2 + ' ' +
tmpfile3)
    # Projeta para o Brasil
    print(exeDir + 'gdal_translate.exe -projwin -73.991975 5.273674 -28.836741 -
33.7498845 -of GTiff ' + tmpfile3 + ' ' + tmpfile4)

```

```

        subprocess.call(exeDir + 'gdal_translate.exe -projwin -73.991975 5.273674 -
28.836741 -33.7498845 -of GTiff ' + tmpfile3 + ' ' + tmpfile4)
        #Recorta para o Brasil
        print(exeDir + 'gdalwarp.exe -cutline ' + fileMask + ' ' + tmpfile4 + ' ' +
outputfile)
        subprocess.call(exeDir + 'gdalwarp.exe -cutline ' + fileMask + ' ' + tmpfile4 + ' '
+ outputfile)
        # Remove arquivos temporarios
        delFile(tmpDir + '*' + date + '*')
        return True

def verifyGenerateFiles():
    printlog('Verifica arquivos a serem gerados')
    files = glob.glob(inputDir + 'OR_ABI-L*' + '_s201????1500*.nc')
    if(len(files) == 0):
        print('Erro. Não há arquivos em ' + inputDir)
        sys.exit()
    print('Verificando arquivos lidos')
    for filename in files:
        id_date = filename.index('_c201')
        date = filename[id_date+2:id_date+13]
        if(not os.path.isfile(outputDir + date + '_GOES_RED.tif')):
            print('Gerando arquivo : %s'%date)
            if(not generateGOES(tmpDir, inputDir, outputDir, filename, date)):
                printlog('Erro em generateGOES [tmpDir: %s, inputDir: %s, filename: %s,
date: %s]%(tmpDir, inputDir, outputDir, filename, date)')
    return

class main:
    # Verifica novos arquivos
    print('... Verificando arquivos atuais')
    verifyGenerateFiles()
    # Programa horário para nova verificação
    schedule.every().day.at("15:00").do(verifyGenerateFiles)
    print('... Esperando novos arquivos')
    while True:
        schedule.run_pending()
        time.sleep(60)

```

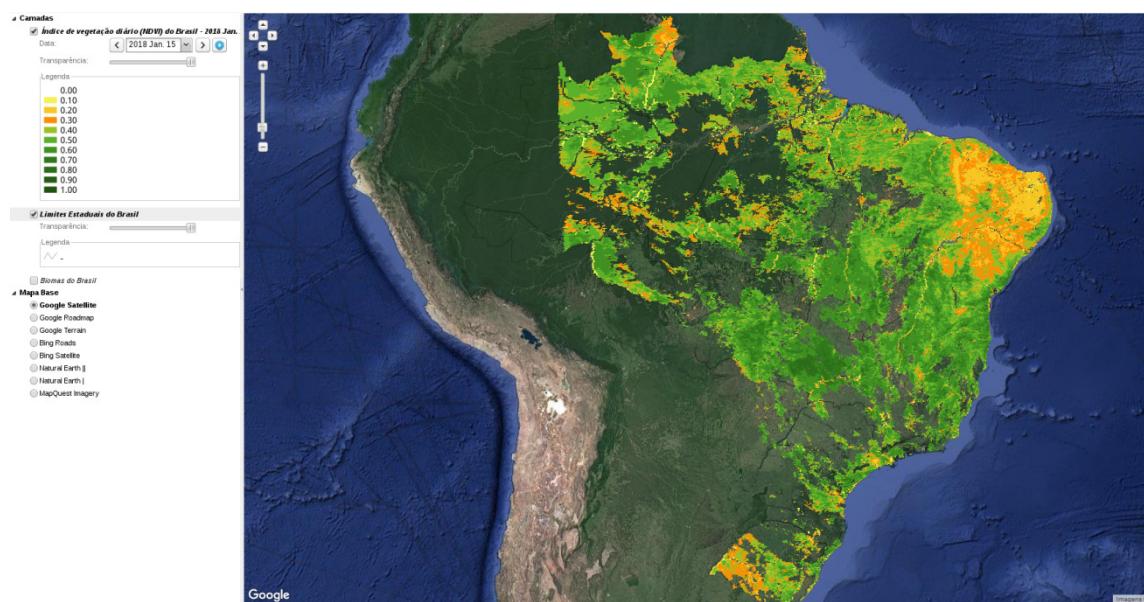


Figura B.3.3. Produto NDVI MSG com resolução temporal diária a ser disponibilizado no sítio do LAPIG.