

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

**MONITORAMENTO DA DINÂMICA DE  
INUNDAÇÃO NO PANTANAL NORTE COM USO DE  
ÍNDICES EVI E LSWI DO MODIS**

**SAIANI ZARISTA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. PETER ZEILHOFER**

CUIABÁ, MT  
DEZEMBRO, 2013

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

**MONITORAMENTO DA DINÂMICA DE  
INUNDAÇÃO NO PANTANAL NORTE COM USO DE  
ÍNDICES EVI E LSWI DO MODIS**

**SAIANI ZARISTA**

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

**ORIENTADOR: PROF. DR. PETER ZEILHOFER**

CUIABÁ, MT  
DEZEMBRO, 2013

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

Z37m Zarista, Saiani.  
MONITORAMENTO DA DINÂMICA DE INUNDAÇÃO NO PANTANAL  
NORTE COM USO DE ÍNDICES EVI E LSWI DO MODIS / Saiani Zarista. -- 2013  
60 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Peter Zeilhofer.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de  
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2013.  
Inclui bibliografia.

1. Áreas alagáveis. 2. MODIS. 3. Índice de vegetação e umidade. 4. Interferência  
atmosférica. 5. , Regressão Logística. I. Título.

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

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

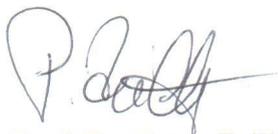
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: MONITORAMENTO DA DINÂMICA DE INUNDAÇÃO NO  
PANTANAL NORTE COM USO DE ÍNDICES EVI E LSWI DO  
MODIS**

**AUTORA: SAIANI ZARISTA**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 11 de dezembro de 2013, pela comissão julgadora:



**Prof. Dr. Peter Zeilhofer**  
**Orientador**

Instituto de Ciências Humanas e Sociais UFMT



**Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes**  
**Examinador Interno**

Instituto de Física – UFMT



**Prof. Dr. Ibraim Fantin da Cruz**  
**Examinador Externo**

Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia - UFMT

## DEDICATÓRIA

Deus, primeiramente pelo dom da vida, consciência, razão, e ao meu esposo Ario van e minha filha Aryani, os quais acompanharam minha jornada de estudos, trabalho, sofrimentos e alegrias durante a realização deste.

## AGRADECIMENTOS

- Ao professor Dr. Peter Zeilhofer, pela orientação, apoio, confiança e amizade durante a realização deste trabalho;
- Ao professor Dr. José de Souza Nogueira, pelo trabalho desenvolvido no programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, que visa auxiliar e ser amigo de todos;
- A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental que sempre estão prontos para transmitirem seus conhecimentos;
- À Soilce e Cesário pela colaboração nos serviços de secretaria que nos auxiliou no desenvolvimento do trabalho;
- Ao CNPq pelo auxílio financeiro;
- Ao colega Sérgio Wagner Gripp da Silveira em especial pela imensa ajuda, orientações, auxílio, paciência e amizade no desenvolvimento deste trabalho;
- A colega Lidiane Maria de Moraes Costa pela ajuda em geoprocessamento prestada para a realização deste trabalho;
- Ao colega Patrick Siqueira da Rocha pelo auxílio em análises estatísticas prestado na realização deste trabalho;
- A todos os colegas de curso que me ajudaram, os quais se tornaram grandes amigos: Aryadne, Cristiano, Maísa, Paula, Pedro, Raphael, Renan, Thomas, Vanessa, Victor, Vinícius.

*“Porque sem mim nada podeis fazer”*

*Jesus (João, 15:5.)*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 REFLEXÃO E EMISSÃO DE ÁREAS ALAGÁVEIS EM DIFERENTES FAIXAS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....	3
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO E PASSIVO PARA MAPEAMENTO DE INUNDAÇÃO .....	4
2.3 APLICAÇÕES DE MODIS PARA MAPEAMENTO DE INUNDAÇÃO .....	8
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	14
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	14
3.2 PRODUTO MODIS (MOD13 Q1) E SEU PRÉ-PROCESSAMENTO .....	19
3.3 MONITORAMENTO DA INUNDAÇÃO NO CAMPO E COMPARAÇÃO COM OS ÍNDICES MODIS .....	20
3.4 ANÁLISE DE DADOS .....	22
3.4.1. Análise exploratória .....	22
3.4.2 Regressão logística.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE O EVI E LSWI.....	26
4.2 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO .....	28
4.3 ANÁLISE DE REGRESSÃO LOGÍSTICA.....	32
4.3.1 Modelos Regressão baseados somente no LSWI para R <sub>0</sub> e R <sub>0/1</sub> .....	32
4.3.2 Modelos Regressão baseados nos índices EVI e LSWI para R <sub>0</sub> e R <sub>0/1</sub> .....	34
5 CONCLUSÃO .....	40
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Localização do Sítio de Amostragem de Longa Duração (SALD).....	16
<b>Figura 2</b> – Mapeamento das unidades fitofisionômicas no Sítio de Amostragem de Longa Duração (SALD), Pantanal, Brasil.....	18
<b>Figura 3</b> – Grade do Pirizal, mostrando as trilhas principais (A, B, C, D, E e F) e as respectivas parcelas (A1 a F5).....	20
<b>Figura 4</b> – Fluxograma das etapas de aquisição e manipulação dos dados da pesquisa.....	22
<b>Figura 5</b> – Correlação de Spearman entre os índices EVI e LSWI por mês e níveis de <i>pixel-reliability</i> 0 e 0/1.....	27
<b>Figura 6</b> – Relação entre EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o <i>Pixel-Reliability</i> 0 (R_0).....	30
<b>Figura 7</b> – Relação entre EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o <i>Pixel-Reliability</i> 0/1 (R_0/1).....	30
<b>Figura 8</b> – Relação entre EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o <i>Pixel-Reliability</i> 0 (R_0) nos meses de Julho, Agosto e Setembro.....	31
<b>Figura 9</b> – Relação entre EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o <i>Pixel-Reliability</i> 0/1 (R_0/1) nos meses de Julho, Agosto e Setembro.....	31
<b>Figura 10</b> – Relação entre EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o <i>Pixel-Reliability</i> 0 (R_0) nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro.....	32
<b>Figura 11</b> – Relação entre EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o <i>Pixel-Reliability</i> 0/1 (R_0/1) nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro.....	32

<b>Figura 12</b> – Mapa da dinâmica de inundação na área de estudo grade SALD Pirizal.....	38
--	----

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Descrição da imagem <i>Pixel-Reliability</i> do produto MOD13Q1.....	09
<b>Tabela 2</b> – Correlação de Spearman para EVI e LSWI para os 40 pontos (grade Pirizal - 23 datas entre dezembro 2007 até novembro de 2008).....	26
<b>Tabela 3</b> – Centros finais da Análise de Agrupamento do EVI para os níveis de <i>Pixel-Reliability</i> 0 e 0 e 1 ( $R_0$ , $R_0/1$ ).....	29
<b>Tabela 4a.</b> – Modelo de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas a partir do índice LSWI (conjunto $R_0$ ).....	33
<b>Tabela 4b.</b> – Modelo de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas a partir do índice LSWI (conjunto $R_0/1$ ).....	33
<b>Tabela 5a-b.</b> – Matrizes de erro das regressões logísticas para diferenciação entre pontos amostrais secos (0) e inundados (1) para <i>Pixel-Reliability</i> 0 (a) e <i>Pixel-Reliability</i> 0/1 (b). $R_0$ (-2 Log likelihood = 1727,923; Cox & Snell R Square = 0,322; Nagelkerke R Square = 0,429). $R_0/1$ (-2 Log likelihood = 1861,008; Cox & Snell R Square = 0,322; Nagelkerke R Square = 0,430).....	34
<b>Tabela 6</b> – Modelos de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas para os quatro <i>clusters</i> separados e o modelo geral, utilizando os índices EVI e LSWI (conjunto $R_0$ ).....	35
<b>Tabela 7</b> – Modelos de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas para os quatro <i>clusters</i> separados e o modelo geral, utilizando os índices EVI e LSWI (conjunto $R_0/1$ ).....	36
<b>Tabela 8</b> – Indicadores do desempenho dos modelos de RL com escalonamento em quatro clusters a partir do EVI/LSWI para <i>Pixel-Reliability</i> 0 e 0/1.....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

EVI – Enhanced Vegetation Index

GHz – Gigahertz

LIDAR – Light Detection and Ranging

LSWI – Land Surface Water Index

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MRT – MODIS Reprojection Tool

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NDWI – Normalized Difference Water Index

NIR – Near-infrared Radiation

nm – Nanômetro ( $10^{-9}$  m)

NPP – Net Primary Production

RADAR – Radio Detection and Ranging

REM – Radiação Eletromagnética

SALD – Sítio de Amostragem de Longa Duração

SAR – Synthetic Aperture Radar

SONAR – Sound Navigation and Ranging

SR – Sensoriamento Remoto

SWIR – Short Wave Infrared

$\rho$  nir – Reflectância do Infravermelho

$\rho$  red – Reflectância do Vermelho

$\rho$  blue – Reflectância do Azul

$\rho(\lambda)$  – Reflectância Visível

## RESUMO

ZARISTA, S. **Monitoramento da dinâmica de inundação no Pantanal norte com uso de índices EVI e LSWI do MODIS.** Cuiabá, 2013, 60 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A dinâmica de inundação no Pantanal determina os processos ecológicos e influencia diretamente na distribuição das unidades fitofisionômicas. Assim, o objetivo deste trabalho foi validar o desempenho dos índices LSWI e EVI do produto MOD13Q1 para monitoramento da inundação na área do Sítio de Amostragem de Longa Duração (grade SALD) Pirizal no Pantanal Norte, avaliando sistematicamente a influência da densidade da cobertura vegetal e do nível de confiabilidade (*Pixel-Reliability*) sobre a capacidade de separar as áreas inundadas das não inundadas. Foram utilizadas imagens multitemporais MODIS do ciclo hidrológico de Dezembro de 2007 a Novembro de 2008. Foram extraídas para as réguas limnimétricas os valores dos índices multitemporais (EVI, LSWI, *Pixel-Reliability*) para dois conjuntos de imagens, um somente de pixel com nível de qualidade de 0 e o outro de 0/1. Após análise exploratória da separabilidade foram desenvolvidos modelos de regressão logística para validar o desempenho da diferenciação de áreas alagadas e não alagadas em função da cobertura vegetal e qualidade dos pixels. Considerando as conhecidas limitações de sensores óticos para detecção de alagamento em áreas vegetadas, os índices EVI e LSWI do MODIS mostraram-se eficientes para o monitoramento de áreas alagadas, alcançando acertos entre 79,95 e 84,56%. A separabilidade diminuía fortemente com acertos abaixo de cerca de 65% em áreas com EVI acima de cerca de 0,45. Os acertos gerais são pouco reduzidas na inclusão de pixels do nível de confiabilidade 0/1. Desta forma recomenda-se a inclusão destes pixels, considerando que incrementado o número de pixels classificados é em média de 7%. O mapa da dinâmica de inundação confeccionado a partir da classificação por Regressão Logística das 23 imagens do ciclo hidrológico, mostrou que as primeiras áreas inundadas se concentraram ao norte do recorte em áreas mais altas da planície, causadas por eventos locais de precipitação. Já o retrocesso do alagamento se iniciou ao noroeste do recorte, partindo de um leque aluvial mais alto, unidade de paisagem predominada por Campos de Murundus.

**Palavras-chave:** Áreas alagáveis, MODIS, Índice de vegetação e umidade, Interferência atmosférica, Regressão Logística.

## ABSTRACT

ZARISTA, S. **Monitoring the dynamics of flooding in the northern Pantanal using index EVI and LSWI MODIS**. Cuiabá, 2013, 60 p. Dissertation (Master Degree in Environmental Physics) – Physics Institute, Mato Grosso Federal University.

Flood dynamics in the Pantanal determine ecological processes and influence directly the distribution of the phytophysiognomic units. In this context, present study objectives the validation of the performance of the LSWI and EVI of the MOD13Q1 product for flood monitoring in the Pirizal Long-Term Sampling Site (LTSS) in the Northern Pantanal, evaluating systematically the influence of the density of vegetation cover and Pixel-Reliability on the separability of flooded and non-flooded areas. Multitemporal MODIS imagery of the hydrological cycle from December of 2007 to November of 2008. The values of multitemporal indices (EVI, LSWI, *Pixel-Reliability*) were extracted for the limnetic stages of the LTSS for two image sets, one only with pixels with Pixel-Reliability 0 and another for pixels with levels 0/1. After an exploratory analysis of the separability, Logistic Regression models were developed to validate the performance in the differentiation between flooded and non-flooded areas in dependence of vegetation cover and pixel quality. Considering the known limits of optical sensors for the detection of flooding in vegetated areas, the MODIS EVI and LSWI indices showed efficiency for flood monitoring, reaching general accuracies between 79,95 e 84,56%. Separability diminishes strongly with general accuracies lower than 65% in areas with an EVI higher than 0,45. Classification performance is little reduced if pixels with a reliability of 0/1 are included. Therefore the inclusion of these pixels is recommended, considering that the number of classified pixels is increased in average by 7%. The map of flood dynamics made from the rank of Logistic Regression of 23 images of the hydrological cycle, showed that the first flooded areas concentrated north of the clipping at higher lowland areas, caused by local rainfall events. Now kick flooding began northwest of the cut, starting from a higher alluvial fan, landscape unit predominated by fields of mounds.

**Keywords:** Floodplains, MODIS, Vegetation and Humidity Index, Atmospheric interference, Logistic Regression.

# 1 INTRODUÇÃO

O Pantanal é uma planície sedimentar de cerca de 138.00 km<sup>2</sup> em território brasileiro a qual se formou no período quaternário, e é preenchida com depósitos aluviais dos rios da Bacia do Alto Paraguai, drena uma área de aproximadamente 500.000 km<sup>2</sup> dos quais dois terços se encontram nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

A planície pantaneira apresenta elevação topográfica entre 100 a 180 metros e relevo baixo e plano, e é circundada por outras duas unidades fisiográficas, o planalto (Província Serrana e Serras Residuais do Alto Paraguai com 250 a 750 m, sendo regiões de cabeceiras) e a depressão (Depressão do Alto Paraguai a noroeste e a Depressão Cuiabana a norte/nordeste com 180 a 250 m, relevo aplainado e uma pequena área com encostas íngremes).

Em função dessas unidades do relevo e altimetria, a sazonalidade das inundações no Pantanal é acentuada, apresentando uma fase de inundação e uma fase de seca, bem pronunciadas, embora algumas áreas permaneçam constantemente inundadas ou secas. A inundação impulsiona a força motriz deste ecossistema de forma monomodal, e fortes intensificações dos períodos de secas e chuvas são decorrentes das flutuações plurianuais do nível hídrico que influenciam sazonalmente as características limnológicas, ecológicas e biológicas.

O estudo da dinâmica de inundação no Pantanal é importante para saber como se dá a manutenção desse sistema e seu funcionamento, pois atua como macrofator que determina a estrutura de funcionamento de ecossistemas alagáveis. Em planícies sazonalmente inundáveis como o Pantanal as flutuações anuais do nível de água regulam os processos ecológicos ali existentes.

Além disso, as diferenças locais de inundação (magnitude e duração), bem como as variações topográficas modelam a paisagem e por consequência a distribuição das unidades fitofisionômicas. Dessa forma, há uma diferença nos tipos de unidades fitofisionômicas em decorrência da combinação dos fatores mencionados no Pantanal.

Essa dinâmica de inundação no Pantanal pode explicar os processos hidrológicos que contribuem para a manutenção da estrutura e função das suas áreas úmidas, assim permite o entendimento de informações sobre os padrões de inundação que são determinados pela origem do alagamento que ocorre pela elevação do nível do lençol freático, transbordamento lateral do rio adjacente, acumulação local da precipitação, ou pela combinação destes fatores que formam um sistema misto.

Devido à grande extensão da planície e seu acesso delicado por causa das características de relevo e formação vegetal, o estudo da dinâmica de inundação depende primordialmente do uso de técnicas de Sensoriamento Remoto. Inúmeros estudos salientam a boa aplicabilidade de sistemas de Radar para o mapeamento da inundação em áreas alagáveis, assim como sensores óticos passivos a exemplo do MODIS que é um instrumento com alto potencial na avaliação da dinâmica de inundação do Pantanal.

O produto MODIS permite obter informações de forma ágil e possibilita detectar diferentes aspectos da superfície do terreno com ampla cobertura e ainda é livremente acessível. Também apresenta vantagens com relação a outros sensores porque têm suas imagens georreferenciadas e corrigidas das interferências atmosféricas, além de possuírem um arquivo de metadados sobre a qualidade dos dados e demais informações técnicas.

Assim, o sensor MODIS permite monitorar em escala continental áreas inundadas, pois apresenta alta resolução temporal (de um dia). A identificação de pixels com inundação pode ainda ser aprimorada pela diferença entre os índices de água na superfície e de vegetação.

Neste contexto, o trabalho teve por objetivo geral validar o desempenho dos índices LSWI e EVI do produto MOD13Q1 para o monitoramento da inundação na área da grade SALD Pirizal, e por objetivos específicos: avaliar sistematicamente a influência da densidade da cobertura vegetal e do nível de confiabilidade (*Pixel-Reliability*), e identificar a capacidade de separação das áreas inundadas das não inundadas durante um ano hidrológico.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 REFLEXÃO E EMISSÃO DE ÁREAS ALAGÁVEIS EM DIFERENTES FAIXAS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**

O fluxo energético recebido e registrado por sistemas de sensoriamento remoto depende principalmente da interação de cada objeto alvo, pois estes transmitem, absorvem, emitem e refletem a radiação eletromagnética recebida por fontes naturais (radiação solar) ou artificiais (ex: microondas emitidas por um sistema de Radar) em proporções que podem variar em função das suas características moleculares. Ou seja, cada objeto tem um comportamento espectral distinto o qual é determinado quando sua energia refletida é medida ao longo do espectro eletromagnético (SAUSEN, 2005).

Do mesmo modo Figueiredo (2005), assegura que cada alvo absorve e/ou reflete de modo diferente em cada faixa do espectro da radiação incidente. Esclarece que desse modo, a reflectância espectral, por exemplo, da água limpa é mais diferenciada da de água com sedimentos, principalmente na faixa espectral da luz visível.

Isso porque ao conduzir uma investigação de Sensoriamento Remoto de corpos d'água, é primeiramente útil entender que a água pura (sem matéria orgânica e inorgânica) seletivamente absorve e/ou espalha a radiação incidente ou a luz solar descendente na coluna d'água. Assim, a coluna d'água é afetada pela luz incidente quando não é pura, mas contém materiais orgânicos e inorgânicos.

Desta forma, o comportamento espectral da água depende dos valores dos coeficientes de absorção, de espalhamento e de atenuação total de moléculas de água pura na faixa espectral (250 nm a 800 nm) (JENSEN, 2009).

Ao longo do espectro a água vai diminuindo a reflectância à medida que se desloca para comprimentos de ondas maiores. “Na região do visível, mais especificamente nas faixas azul e verde, observa-se significativa reflectância da água, diminuindo-se gradualmente na direção do infravermelho” (FIGUEIREDO, 2005, p. 8).

Segundo Darch (1979), a identificação de água limpa e água contendo sedimentos em suspensão é dada através das diferenças nas assinaturas espectrais. Em seu trabalho verificou que através de imagens Landsat na banda 4 com filtro azul e na banda 7 com filtro vermelho, as áreas molhadas (úmidas) foram mostradas em tons de preto e azul. Onde a água limpa foi representada por uma assinatura espectral de preto, já a água contendo sedimentos em suspensão foi representada por uma assinatura espectral azul. E isso se explica pelo fato da água limpa absorver a luz na faixa de 0,8 nm a 800 nm, e também pelo elevado coeficiente de reflexão dos sedimentos suspensos.

Estudando a influência dos processos verticais da água em áreas de várzea na modelagem da dinâmica espaço-temporal de larga escala no Pantanal (PAZ et al., 2013) descobriram que a inundação está relacionada com o regime de vazão do rio, e que os resultados obtidos mostram que os processos de água verticais sobre a planície são necessários para modelar adequadamente a troca de água lateral do canal principal e a planície de inundação. Isso porque a intensidade do efeito do equilíbrio da água vertical foi diretamente relacionada com o volume de água a partir do ganho da planície, em termos de quantidade e tempo.

## **2.2 SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO E PASSIVO PARA MAPEAMENTO DE INUNDAÇÃO**

O monitoramento da inundação de áreas alagáveis pode ser realizado por técnicas ativas e passivas de Sensoriamento Remoto (SR), entre elas microondas ativas (Radar), microondas passivos e SR ótico. Todas as técnicas citadas possuem tanto aspectos positivos e negativos, os quais são resumidos ao longo deste subitem.

Sistemas ativos de Radar, que atuam na faixa de microondas (0,3 a 100 cm), apresentam uma capacidade de coletar dados diurnos e noturnos, pois possuem fonte própria de radiação eletromagnética (REM).

Os sistemas comumente utilizados são do tipo radares de abertura sintética SAR (*Synthetic Aperture Radar*), nos quais segundo Andrade (1999), cria-se uma antena virtual centenas de vezes maior que seu tamanho físico. A capacidade de diferenciar entre os diversos alvos na superfície terrestre se define, além do comprimento de onda da radiação (bandas X, C, S, L, e P), pela polarização, pelo ângulo de incidência e direção do pulso emitido pela antena (Meneses et al., 2012).

De acordo com Henderson et al. (2008), as imagens de radar SAR possuem aplicabilidade para monitoramento da extensão e tempo de inundação, inclusive para a detecção de inundação em dossel de vegetação. As imagens SAR na banda L e P tendem a ser mais sensíveis à umidade do solo e a inundação em áreas com cobertura vegetal do que em bandas de menor comprimento de onda.

Assim, Costa et al. (1998), que explorava dados multiângulo de incidência e multifrequência dos sistemas Radarsat e JERS-1 da Amazônia, recomendava para a detecção de áreas úmidas e alagadas a banda L. Segundo Teixeira (2011), em florestas inundadas o espalhamento com duplo retorno “*double-bounce*” ocorre pelas múltiplas reflexões e pode ter um efeito considerável no valor total do coeficiente de retroespalhamento, quando a transmissividade do dossel e dos troncos é suficientemente alta. Isso acontece no caso da banda L que tem um comprimento de onda maior atravessando a estrutura do dossel, a energia transmitida em pequenos ângulos de incidência faz uma rota menor através do dossel, aumentando assim a transmissividade na copa das árvores e levando mais energia para interagir com os troncos e superfície.

Estudos com imagens PALSAR/ALOS na planície pantaneira mostraram bom desempenho da banda L para diferenciação de florestas não inundadas e inundadas que possuem um coeficiente de retroespalhamento total maior (OLIVEIRA, 2013). Já em casos de superfícies com vegetação herbácea, a capacidade de diferenciação é limitada, tendo áreas inundadas e não inundadas características de espalhamento especular, com baixos níveis de retroespalhamento.

O imageamento interferométrico como técnica específica de radar é o processo pelo qual as imagens de radar de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em diferentes localizações ou em tempos diferentes. Assim a análise de

dois interferogramas permite medidas muito precisas sobre o deslocamento de qualquer ponto específico, permitindo assim também a análise de mudança de níveis de inundação (Jensen, 2009).

Os sistemas de SR com sensores passivos de microondas possuem baixíssima resolução espacial, devido ao baixo fluxo energético produzido nessa faixa espectral. Considerando estes sistemas passivos de microondas, temos exemplos de trabalhos realizados por Sippel et al. (1994), que mostraram o uso de sensores de emissão passiva de microondas pelo sensor SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*) a bordo do satélite Nimbus - 7, que proporcionou um indicador sensível da presença de água superficial e os dados gerados forneceram informações sobre padrões de inundação sazonal em grandes áreas úmidas na planície de inundação do rio Amazonas e Pantanal.

Em outro trabalho Sippel et al. (1998), estudaram a respeito da relação entre a área de inundação e a várzea do rio Amazonas através de observações de microondas passivas, mostraram que o uso do sensor SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*) permitiu obter informações de ambientes inundados sazonalmente em grandes áreas tropicais.

Em trabalho mais recente Dantas et al. (2009), utilizaram dados de variação sazonal em sub-regiões inundadas do Pantanal através de emissão passiva de microondas pelo SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*) e obtiveram padrões de inundação semelhantes em diferentes sub-regiões do Pantanal e forte correspondência fenomenológica com a hidrologia da região estudada.

Diversos sensores a bordo do satélite Aqua da NASA, lançado em 4 de maio de 2002, incluem radiômetros de microondas passivas especializados em prever fenômenos locais como chuvas fortes, propriedades físicas das nuvens, temperatura na superfície do oceano, velocidade do vento, fluxo de energia radiante, presença de água, neve ou gelo na superfície terrestre como o AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*). Kawanishi et al. (2003), mostravam a contribuição do AMSR-E para observações de parâmetros geofísicos globais relacionados com a

água para esclarecer o mecanismo da circulação global de água e energia, e também para monitoramento de mudanças climáticas.

Já o sensor AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*) mede a temperatura atmosférica global e adquire dados sobre a água disponível na atmosfera em todas as formas (exceto das pequenas partículas de gelo que são transparentes aos comprimentos de onda do sensor). Conforme Kidder et al. (2000), o sensor AMSU é bem adequado para observações de ciclones tropicais porque suas medições não são afetadas pela presença de nuvens de gelo que cobrem as tempestades tropicais, também é um instrumento de medição na faixa de microondas que apresenta uma boa resolução espacial, radiométrica e maior precisão que instrumentos sonoros anteriores.

De forma resumida, o uso de imagens SAR apresentam vantagens como, não apresentar interferências atmosféricas (cobertura de nuvem ou limitação solar), sendo capazes de detectar inundação abaixo da vegetação em alguns comprimentos de onda, principalmente em vegetação de floresta (FRANÇA, 2005).

Mas tais sistemas sensores ativos acabam apresentando alguns aspectos desvantajosos como limitações do período de recorrência em relação a alguns sensores óticos passivos como exemplo o MODIS, elevado custo na aquisição dos dados, e no que concerne a áreas alagadas com formações herbáceas este perde sua eficácia no momento de analisar os dados adquiridos da área de estudo (SAKAMOTO et al., 2005).

Já os produtos de SR de sistemas passivos em meio a limitações como interferências atmosféricas, alguns sensores não possuem resolução temporal boa, apresentam grande aplicabilidade para estudos ambientais, em especial no monitoramento de inundação, pois possibilitam monitorar tais eventos.

## 2.3 APLICAÇÕES DE MODIS PARA MAPEAMENTO DE INUNDAÇÃO

Estudos têm demonstrado que os constituintes atmosféricos (nuvens, gases e aerossóis) afetam os oceanos, a superfície terrestre de forma geral inclusive a atmosfera. Assim para tentar entender como procede toda a dinâmica da Terra como um ecossistema integrado, a comunidade científica busca construir modelos de dinâmica global da Terra através de uma grande gama de informações que devem ser coletadas diariamente por um longo período de tempo.

Desta forma, foram desenvolvidos novos instrumentos para a coleta destes dados, tendo a exemplo o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), que consiste no principal sensor instalado nos satélites TERRA e AQUA (lançados em 1999 e 2002, respectivamente) para monitoramento da superfície terrestre. Possui 36 bandas espectrais (que fornecem dados das propriedades das nuvens; a dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre; e a temperatura da superfície dos oceanos), resolução temporária diária, resolução radiométrica de 12 bits e, em função da faixa espectral e subproduto gerado, resolução espacial entre 250 m e 1000 m (LATORRE et al., 2003).

Por serem disponíveis de forma gratuita e fornecidas já com pré-processamento geométrico e radiométrico (correção atmosférica), as imagens MODIS propiciam uma ótima fonte de dados orbitais para estudos da dinâmica de inundação em áreas de grande extensão.

O produto MOD13 do sensor MODIS apresenta uma resolução espacial de 250 metros com dados coletados no período de 16 dias, com cobertura global quase diária.

A composição da resolução radiométrica deste produto é gerada pelas bandas 1 (620-670 nm - vermelho), 2 (841-876 nm – NIR), 3 (459-479 nm – azul), 4 (545-565 nm), 5 (1230-1250 nm), 6 (1628-1252 nm), 7 (2105-2155 nm – SWIR), direcionadas para aplicações terrestres. Das bandas 8 a 16 (405-420 nm a 862-877 nm) são destinadas para estudos da cor dos oceanos, fitoplâncton e bioquímica; da

banda 17 a 19 (890 nm a 965 nm) dedicadas ao vapor d'água na atmosfera; da banda 20 a 23 (3660 nm a 4080 nm) voltadas para temperatura das nuvens e superfície; da banda 24 a 32 (4433 nm a 12270 nm) designadas à temperatura atmosférica, cirrus, vapor d'água, ozônio e temperatura das nuvens), já da banda 33 a 36 (13185 nm a 14384 nm) destinadas a altitudes e topos de nuvens, conforme Anderson et al. (2003).

Para Padovani (2010), as imagens MODIS são uma solução para obtenção de dados da dinâmica de inundação. Por mais que seja uma tecnologia recente, já é muito utilizada para viabilizar o uso de índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e EVI (Índice de Vegetação Aprimorada) das imagens MODIS na detecção das áreas alagadas e para estudo de vegetação e uso do solo do Pantanal utilizando diversas metodologias.

Assim, estudos de mapeamento de inundação a partir de dados do MODIS mostraram que a característica multiespectral deste, aliada à alta frequência temporal de imageamento diário lhe afere um potencial para monitoramento ambiental em nível regional, e permite um nível de detalhamento compatível com o mapeamento no Pantanal.

Além disso, este produto utiliza o Index da *Pixel-Reliability* (confiabilidade do pixel) para analisar a influência de pixels com nuvens e sombras de nuvens, conforme descrito na tabela 1.

**Tabela 1** – Descrição da imagem *Pixel-Reliability* do produto MOD13Q1.

Valor do Pixel	Resumo QA	Descrição
-1	Sem Dado	Não processado
0	Dado Bom	Uso com confiança
1	Dado Marginal	Utilizável
2	Neve/Gelo	Alvo coberto com neve/gelo
3	Nuvem	Alvo coberto com nuvens

Fonte: Adaptado do MODIS VI User Guide, 2010.

Em se tratando de estudo de áreas alagáveis além do uso de índices EVI e NDVI, a literatura acadêmica traz trabalhos como de Oliveira (2010), que utiliza o índice de umidade NDWI (*Normalized Difference Water Index*) que é recomendado para fazer monitoramento e mapeamento de mudança de uso e cobertura do solo em

bacias hidrográficas, assim como para estudos associados a áreas com grande predominância de água como lagoas, áreas com vegetação fotossinteticamente ativa, planície de inundação e lagoas temporais.

O índice de umidade (NDWI) é obtido através da razão entre a diferença da refletividade do infravermelho próximo ( $\rho_{IV}$ ) e do infravermelho médio ( $\rho_{MIR}$ ), e a soma das mesmas:

$$NDWI = \frac{\rho_{IV} - \rho_{MIR}}{\rho_{IV} + \rho_{MIR}} \quad 1$$

onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_{MIR}$ , correspondem respectivamente, às bandas 4 e 5 do TM – Landsat 5 (OLIVEIRA, 2010).

O índice de umidade proposto por Gao (1996), mostra que o NDWI está relacionado com o conteúdo de água presente nas folhas, onde os valores negativos representam áreas com vegetação seca e valores positivos para vegetação verde. Assim, o NDWI é útil em sensoriamento remoto para detecção de água em estado líquido na vegetação a partir do espaço, reflectância das propriedades de vegetação verde, vegetação seca e solo, e a propriedade de absorção e dispersão de gases atmosféricos e aerossóis.

Chandrasekar et al. (2010), também empregaram o índice NDWI com a combinação das bandas NIR (858 nm) e SWIR (1640 nm), que apresentam um potencial de recuperar o teor de água do dossel e os índices derivados de ambas as bandas. O referido trabalho também utilizou a combinação das bandas NIR (858 nm) e SWIR (2130 nm) como Índice de Água da Superfície da Terra (LSWI), utilizando este comprimento de onda do (SWIR) foi mais útil na extração da vegetação com presença de água e na determinação de seca, devido à faixa de 2130 nm ser menos afetada pelo ozônio. Portanto o LSWI é uma medida de água em estado líquido em copas de vegetação, que interage com a radiação solar, portanto, é sensível ao total da quantidade de água líquida na vegetação.

Xiao et al. (2002, 2006), também utilizaram esta mesma combinação das bandas NIR e SWIR para se referirem ao índice de água da superfície da terra (LSWI). Deste modo o LSWI é útil em SR porque detecta a água em estado líquido

na vegetação a partir do espaço, reflectância da vegetação, propriedade de absorção e dispersão de gases atmosféricos e aerossóis.

Sakamoto et al. (2007), usaram o índice de umidade (*Land Surface Water Index* - LSWI) e os índices de vegetação (NDVI e EVI) para estimar a distribuição espaço-temporal dos campos de arroz no sul da China e no sul e sudeste da Ásia, utilizaram a equação seguinte para dados do sensor MODIS:

$$LSWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad 2$$

onde NIR é o valor da reflectância no infravermelho próximo (841 - 875 nm), vermelho (621 - 670 nm), e azul (459 - 479 nm), e SWIR na onda curta do infravermelho (1628 - 1652 nm).

O produto MOD 13 possui dois índices de vegetação, o índice da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e o índice de vegetação melhorado (*Enhanced Vegetation Index* - EVI). Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível a variações na resposta estrutural do dossel (HUETE et al., 2002).

Conforme Chandrasekar et al. (2010), o NDVI tornou-se a principal ferramenta para a descrição de mudanças de vegetação e interpretação do impacto de fenômenos ambientais. Também é utilizado para monitoramento de chuva e seca, para estimar a produção primária líquida (NPP) da vegetação, detectar impactos climáticos e outros eventos importantes para a agricultura, ecologia e economia.

De acordo com (LATORRE et al., 2003) o NDVI é uma relação entre medidas espectrais (reflectância –  $\rho$ ) de duas bandas, a do infravermelho próximo (800 - 1100 nm) e a do vermelho (600 - 700 nm) e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimiza os efeitos da atenuação atmosférica, observados para dados multitemporais. Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1, comumente expressada na seguinte equação.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad 3$$

O NDVI tem a vantagem de minimizar certos tipos de ruídos e influências atribuídas a variações na irradiação direta e difusa, nuvens e sombras de nuvens, sol e vista de ângulos, topografia e atenuação atmosférica. Isso porque utiliza a diferença de (NIR) e a reflectância vermelha como um estimador do nível de influência atmosférica, assim a dispersão transversal na banda azul é maior que na faixa vermelha e quando o aerossol tem uma concentração muito elevada esta diferença entre as duas bandas torna-se maior, desta maneira este índice é utilizado para estabilizar as variações nos níveis de concentração de aerossol (MODIS, 2010).

Este índice (NDVI) por ser baseado nas bandas do vermelho (RED) e infravermelho próximo (NIR) absorve a clorofila e tem a mais alta reflectância na copa da vegetação. Logo o NDVI representa a clorofila ao invés do teor de água (CHEN et al., 2005).

O EVI é um NDVI modificado, por conter um fator de ajuste para solos e dois coeficientes que descrevem o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis (JENSEN, 2009).

O EVI tem uma melhor sensibilidade sobre regiões de elevada biomassa e maior capacidade de monitoramento da vegetação através de uma dissociação do sinal de fundo do dossel e uma redução de influências da atmosfera (MODIS, 2010).

O índice de vegetação EVI é obtido pela seguinte equação:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue} + L} \quad 4$$

onde  $\rho$  são as reflectâncias de superfície total ou da atmosfera parcialmente corrigida (para espalhamento Rayleigh e absorção de ozônio); L é o fator de ajuste para o solo, com valor constante igual a 1; C1 e C2 são os coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera com valores constantes iguais a 6 e 7,5, respectivamente; e G o fator de ganho, com valor igual a 2,5 (GOLTZ et al., 2007).

No caso do EVI, este separa o solo e as influências atmosféricas a partir do sinal de vegetação, incluindo um termo feedback para correção simultânea. Foi

desenvolvido para aperfeiçoar o sinal da vegetação melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além do monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (ANDERSON et al., 2003; MODIS, 2010).

Esses índices de vegetação têm suas bases teórica e empírica derivados a partir do exame das assinaturas espectrais de reflectância típico das folhas. Como a energia refletida na faixa do visível é muito baixa, utiliza-se a faixa do infravermelho próximo (NIR), pois permite uma menor absorção e uma maior reflectância, detectando melhor desta maneira a vegetação. Assim, em se tratando de monitoramento de inundação no Pantanal estes índices são os mais indicados para se fazer um estudo mais eficaz para acompanhar como o processo de inundação se dá em determinada área ou mesmo como um todo em uma área relativamente grande.

Desse modo, ao levar-se em consideração a variedade da paisagem na área de estudo, a qual apresenta lagoas, áreas alagadas com presença de vegetação e áreas secas com e/ou sem vegetação, a reflexão desses objetos é distinta. Assim, a resolução espectral do MODIS em quatro bandas reflectivas (azul, vermelho, infravermelho e infravermelho médio) além dos produtos de índice de umidade e vegetação, indicam ser suficientes para a extração de áreas inundadas (PADOVANI, 2010).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O Pantanal Matogrossense apresenta na sua porção dentro do território brasileiro, uma superfície de 138.000 km<sup>2</sup> que se estende sobre a margem esquerda do rio Paraguai. A planície alagável está inserida na bacia do Alto Paraguai, entre as latitudes 15°30' e 22°30' Sul e longitudes 54°45' e 58°30' Oeste, possuindo áreas nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Para Darch (1979), é uma área de baixa altitude ao longo sistema de drenagem do Paraná-Paraguai no Oeste do Brasil Central com fronteira entre Bolívia e Paraguai.

Sua hidrografia é formada por grandes rios como o Paraguai, Cuiabá, São Lourenço, Piquiri, Taquari e Negro, entre outros. Deste modo a complexa rede hidrológica em conjunto com diferentes tipos de solo dá origem a uma enorme diversidade de paisagens (DNOS, 1974 apud FANTIN-CRUZ et al., 2010).

No que concerne ao clima, Amaral Filho (1984) apud Fantin-Cruz et al. (2010), afirma que é do tipo AW de Köppen, quente e úmido com chuvas no verão e estiagem no inverno. Conforme (ADÁMOLI, 2000), no Pantanal as chuvas médias anuais variam entre 900 mm no sudoeste e quase 2.000 mm no Norte e Nordeste, e com temperaturas médias anuais oscilando em torno dos 24°C.

A média anual de temperatura oscila entre um máximo de 29 a 32°C e um mínimo de 17 a 20°C. Já os solos são de origem sedimentar ocorrendo em fase argilosa e arenosa e descontínua, com dominância de solos hidromórficos compondo 92,5% do total.

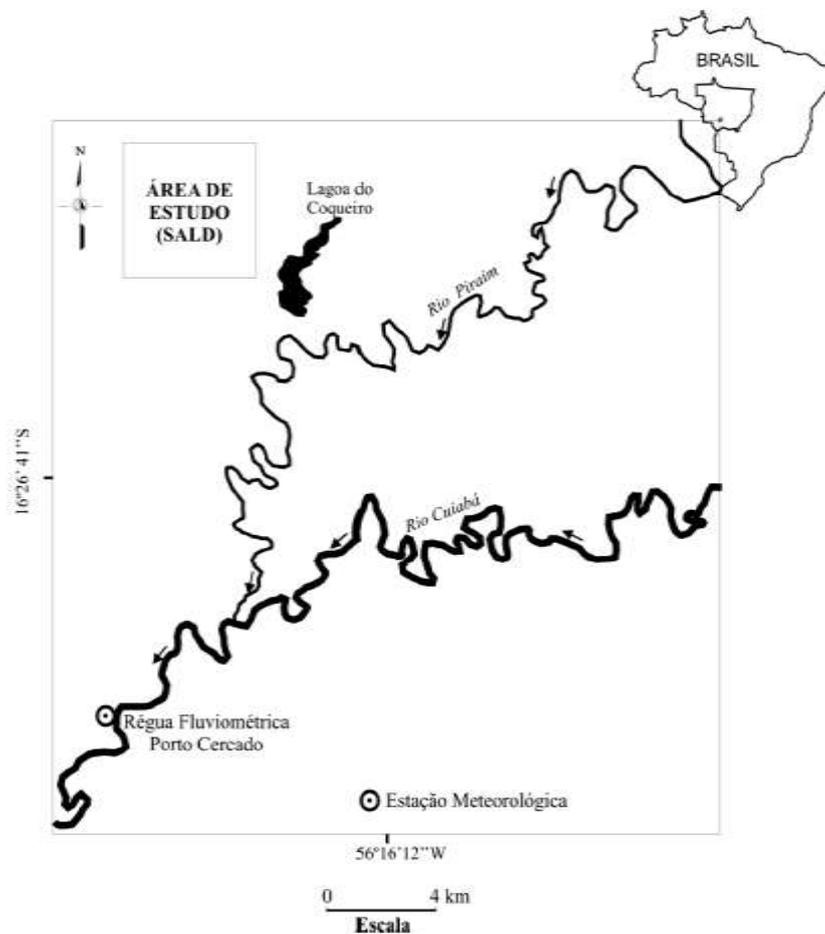
O Pantanal é marcado por um ciclo anual de estado de inundação e não inundação, que para Junk et al. (1989), é este pulso de inundação que considera trocas entre as fases terrestre (seca) e aquática (cheia) nas planícies alagáveis. Mas nem todas as áreas inundáveis do Pantanal têm relação de troca com os rios. Distintas vezes o rio perde água para a planície, e este por sua vez não retorna para o canal do rio, e ocorrem inclusive situações em que o rio é tomado por uma onda de inundação como no caso do rio Paraguai na sub-região do Paraguai e não representa o papel principal gerador do processo de inundação.

A área de estudo está inserida na parte norte do Pantanal no município de Nossa Senhora do Livramento em Mato Grosso, e pertence a uma sub-bacia do rio Cuiabá, localizada paralelamente ao curso do mesmo (FANTIN-CRUZ et al., 2010).

É neste contexto que está inserida a área de estudo, que conforme (FERNANDES; SIGNOR et al., 2010) esta área corresponde com a grade SALD (Sítio de Amostragem de Longa Duração) do Pirizal que foi instalada em 2005 em áreas de fazendas com criação de gado. A grade consiste em 40 parcelas amostrais (réguas limnimétricas) distribuídas em uma área de 25 km<sup>2</sup>. Cada parcela segue o contorno topográfico do solo, a fim de minimizar a variação topográfica interna, elas estavam a uma distância de 1 km uma da outra.

O monitoramento da inundação na planície ocorreu com leitura direta da profundidade da coluna de água. Observações de campo mostraram que quando começa a inundar, três canais temporários (paleo-canais) são os primeiros a estabelecer a ligação entre o rio e a várzea. Isso mostra que a inundação não é causada por excesso de fluxo de banco através dos diques, desde quando isso ocorre, a várzea já é inundada por emissão de água dos paleo-canais.

Tais canais servem para drenar a água da chuva local, uma vez que são as partes mais baixas da planície de inundação. As chuvas locais assim como a contribuição das águas subterrâneas nesta área é considerada mínima. Assim, as unidades geomorfológicas distintas na planície de inundação do rio Cuiabá estão conectadas umas com as outras e para o rio através dos paleo-canais (FANTIN-CRUZ et al., 2011).



**Figura 1** - Localização do Sítio de Amostragem de Longa Duração (SALD). Fonte: Fantin-Cruz et al., (2010).

De acordo com Fantin-Cruz et al. (2010), esta planície apresenta alta complexidade estrutural, expondo a inundação associada ao regime hidrológico, que provoca expansão, contração e fragmentação dos sistemas aquáticos, bem como interferência no grau de conectividade entre as partes do sistema. Com esta expansão dos sistemas aquáticos há inundação de porções da planície que instituem ligações entre o rio, lagoa e rio, planície e lagoa e entre os próprios compartimentos da planície.

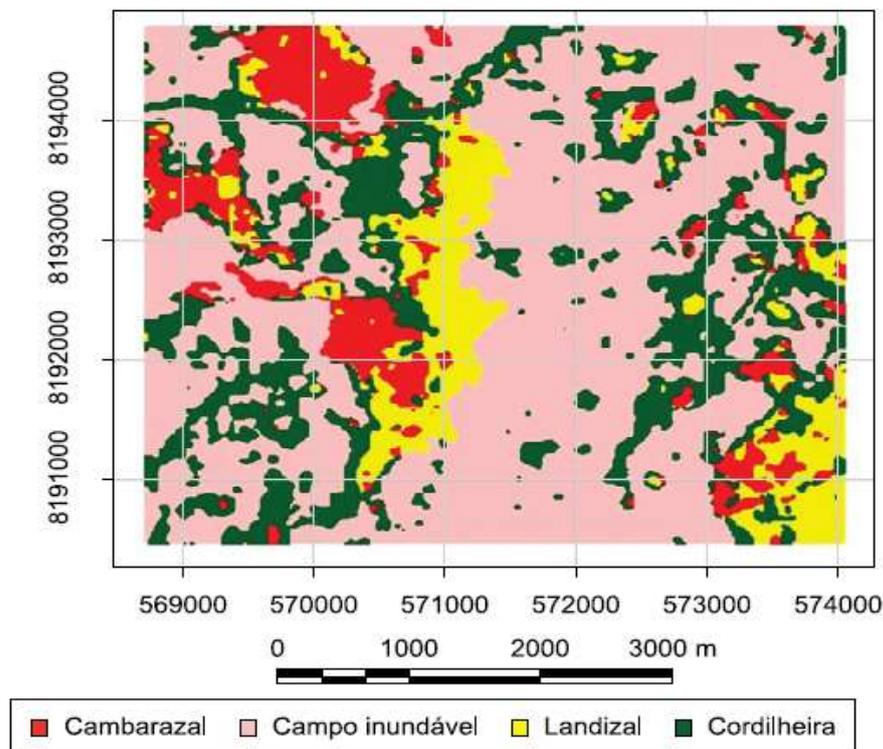
Na  rea de estudo a inundação é produzida pela combinação de dois fatores, a inundação originária do rio Cuiabá e a precipitação local. Nesse sentido “indícios” sugerem que a manutenção do alagamento na grade só ocorre quando o rio supera o nível fluviométrico de 4 m na régua de Porto Cercado (localizada a 20 Km a jusante da grade). A partir deste nível a chuva local começa a ter maior importância para o alagamento, pois a saturação do solo e o alto nível do rio Cuiabá não permitem o escoamento da água que acumula sobre o solo. Com isso, observa-se que o rio

Cuiabá tem influência na inundação regional, mas que as variações locais também são influenciadas pelas chuvas e pelo escoamento superficial. Provavelmente a distância entre a grade e o rio Cuiabá deve atenuar seu efeito na variação local da inundação (FANTIN-CRUZ, et al. 2010, p. 28-29).

Esse regime de inundações no Pantanal é muito importante porque determina os processos bióticos e todo o fator ecológico de composição das unidades de paisagens distintas do local. Esse regime de inundações possibilita uma acelerada ciclagem de nutrientes, igualmente torna os ambientes altamente produtivos e esclarecem em parte a enorme concentração de seres vivos na planície.

Na área de estudo conforme Fantin-Cruz et al. (2010), no SALD foram identificadas quatro unidades fitofisionômicas, dentre elas o Campo inundável (Savana gramíniolenhosa sazonalmente inundável) que predominou na cobertura da área de estudo com 56,4%; seguida pela Cordilheira (Savana arbórea densa com *Curatella americana* L. e *Dpteryxalata* Vogel.) com 23,0%, Landizal (Floresta sempre verde sazonalmente inundável com *Clophyllum brasiliense* Camb.) com 10,5%; e Cambarazal (Floresta monodominante sazonalmente inundável de *Vochysia divergens* Pohl.) com 10,1%. Esta heterogeneidade fitofisionômica está ligada às variações do relevo e topografia, à estrutura do solo e aos padrões espaço-temporal da inundação, que se comprovaram através de coletas pontuais ao longo de transectos, onde se verificou que nesta pequena amostra estas unidades fitofisionômicas estão ligadas à inundação e não à topografia.

Essa situação da distribuição da vegetação na área de estudo verifica-se na figura 2.



**Figura 2** - Mapeamento das unidades fitofisionômicas no Sítio de Amostragem de Longa Duração (SALD), Pantanal, Brasil. Fonte: Fantin-Cruz et al., (2010).

Soma-se a essa classificação que no Pantanal há uma enorme diversidade de ambientes, isso porque apresenta uma heterogeneidade edáfica e hidrológica. No Pantanal há um mosaico de espécies agrupadas em quatro classes fitoecológicas como a Savana (Cerrado), Savana Estépica (Vegetação Chaquenha), Floresta Estacional Semidecidual (30% de árvores caducifólias no período seco) e Floresta Estacional Decidual (60%). Também aparecem áreas de tensão ecológica (ecótonos) com misturas entre formações distintas de regiões fitoecológicas de diferentes litologias, formas de relevo e transições climáticas. Mas no Pantanal o principal recurso florístico é composto de pastagens naturais que envolvem desde vegetação aquática à arbórea (PADOVANI, 2010).

Portanto, a grade SALD Pirizal em estudo apresenta diversidade de ambientes e também um fluxo de inundação proveniente tanto do rio Cuiabá quanto das chuvas locais, e isso ajuda a compreender posteriormente os dados extraídos das assinaturas espectrais referentes ao comportamento da inundação nesta área com relação à resposta espectral da vegetação.

### **3.2 PRODUTO MODIS (MOD13 Q1) E SEU PRÉ-PROCESSAMENTO**

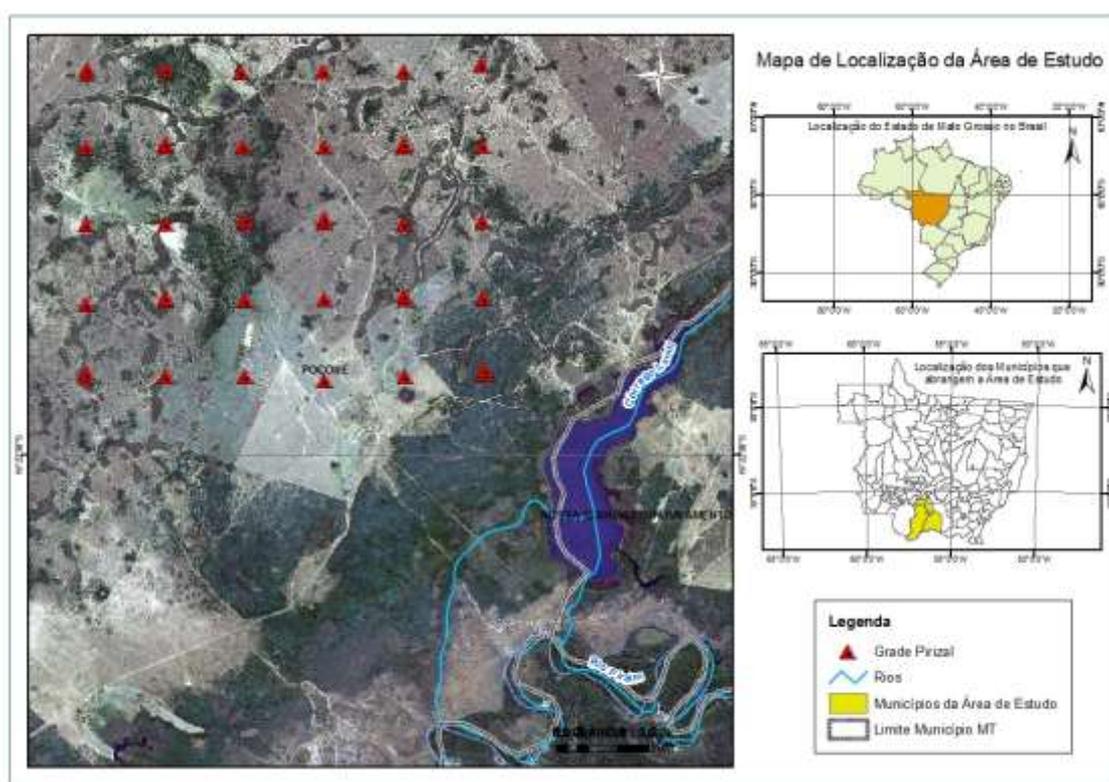
O produto da superfície terrestre do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), foi adquirido gratuitamente no site [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access), mantido pela NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (NASA, 2010).

Utilizou-se o Index da *pixel-reliability* (confiabilidade do pixel) para análise da influência de pixels com nuvens e sombras de nuvens dos anos de 2007 a 2008 (janeiro a dezembro), conforme tabela 1.

Foram incluídas nas análises, conjunto de 23 imagens (períodos de 16 dias) referente ao ano hidrológico de dezembro de 2007 até dezembro de 2008. As imagens do sensor MODIS vêm no sistema de projeção sinusoidal e no formato HDF (*hierarchial data format*). A extração foi através da ferramenta do software MODIS *Reprojection Tool* ([https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis\\_reprojection\\_tool](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool)), e foram reprojctadas para a projeção WGS-84 e formato GeoTiff, fazendo o recorte para a área de estudo (MORAES et al., 2011).

### 3.3 MONITORAMENTO DA INUNDAÇÃO NO CAMPO E COMPARAÇÃO COM OS ÍNDICES MODIS

A realidade de campo (estado de inundação em um determinado momento) foi obtida pela grade Pirizal num período de janeiro a dezembro nos anos de 2007 a 2008, onde a inundação teve início em 21 dezembro de 2007 estendendo até 14 junho de 2008, sendo o rio Cuiabá o maior responsável pelo processo de inundação com contribuição de chuva local (FANTIN-CRUZ, 2008).



**Figura 3** – Grade do Pirizal, mostrando as trilhas principais (A, B, C, D, E e F) e as respectivas parcelas (A1 a F5).

Foi realizada a extração das assinaturas espectrais para um total de 40 pontos (grade Pirizal), sendo os mesmos com valores de pixels para lagos, áreas de floresta decidual, pastagem limpa e pastagem com sucessão na depressão Cuiabana perto da transição para o Pantanal.

Nas imagens MODIS foi realizada a composição das bandas no ArcCatalog, posteriormente foram extraídos os valores espectrais dos pontos de coleta da grade Pirizal. Em seguida organizou-se uma tabela constando os pontos, as datas de coleta,

as datas das imagens MODIS, e os valores de medida em campo da situação de inundação, e os valores de cada pixel referente aos índices utilizados (EVI, LSWI e Reliability) com preenchimento manual.

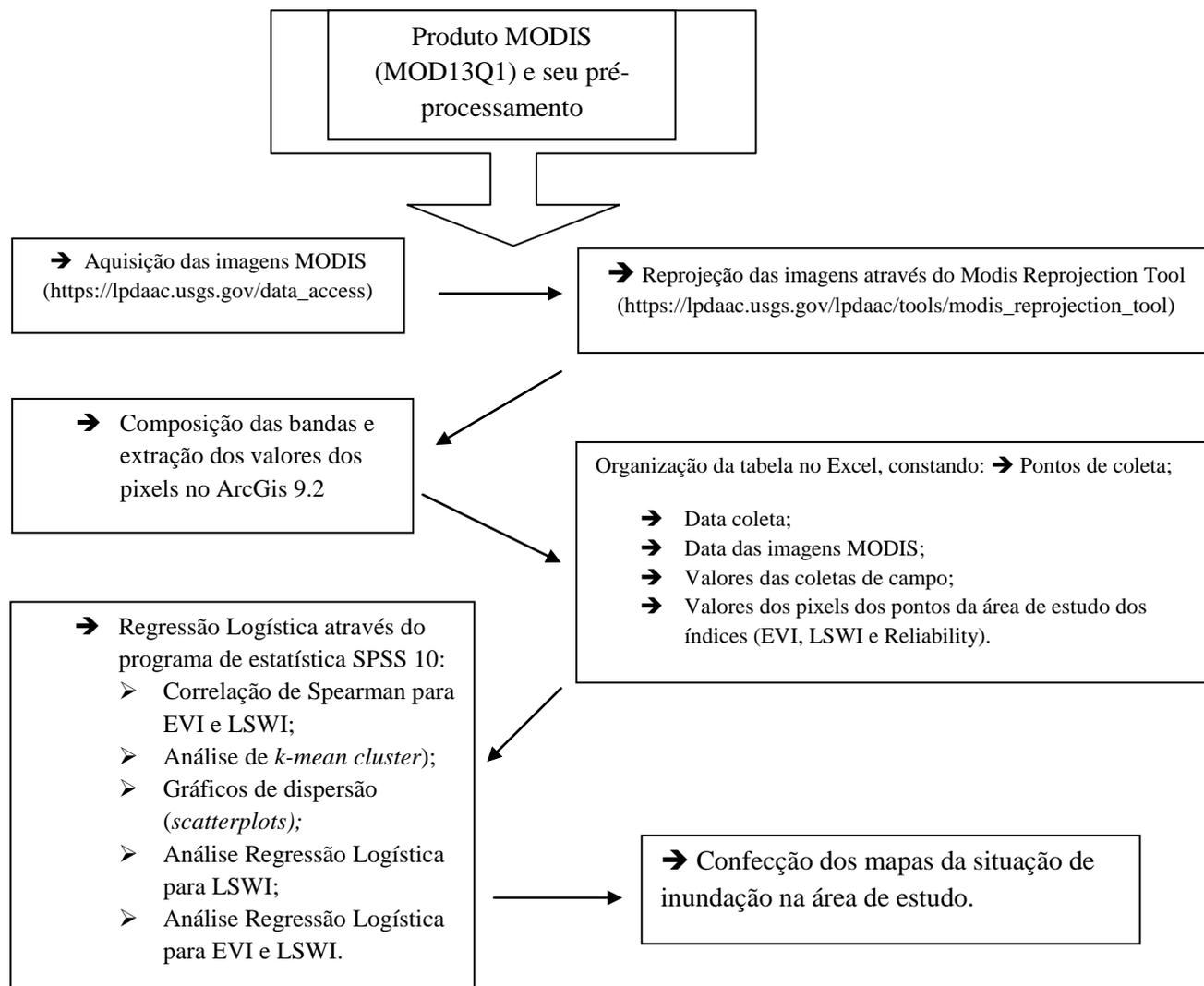
A tabela foi confeccionada no programa Excel com posterior exportação para o programa de estatística SPSS na versão 10. Neste programa os dados exportados foram tratados com filtros para fazer os testes de regressão logística e do agrupamento entre os índices EVI e LSWI, verificando a eficácia dos valores dos pixels destes índices para estado de inundação dos pontos de coleta da área de estudo.

Ao final do processo foi possível confeccionar o mapa da dinâmica de inundação na área de estudo. Neste processo foi acrescentada aos 23 pares de imagens do MODIS uma máscara de confiabilidade do pixel (Reliability 1 a 3), que abrange dado marginal e dado de nuvem, que corresponde à interferência no valor do pixel. Em seguida aplicou-se uma fórmula de regressão logística às imagens para fazer a separação de dados de inundação e de não inundação.

$$\text{(grid1 / grid1 / ((Exp (-grid1 * ((Band\_X * -9.732) + (Band\_X * 10.449) + (grid1 * -1.79)))) + grid1))$$

5

A sucessão de imagens representam os pares das imagens que vão do dia (01 ao 353 – dias julianos) dos anos de 2007 a 2008, completando um ciclo hidrológico de acompanhamento.



**Figura 4** - Fluxograma das etapas de aquisição e manipulação dos dados da pesquisa.

## 3.4 ANÁLISE DE DADOS

### 3.4.1. Análise exploratória

A separabilidade entre áreas inundadas e não inundadas somente a partir do índice de umidade como o LSWI é limitada e pode implicar em erros de classificação elevados (FRAZIER; PAGE, 2000). Estudos prévios como os de Zeilhofer (2006) mostraram, que índices de umidade de solo como também do estado de inundação

extraídos de sensores óticos de sensoriamento remoto, variam fortemente em função da cobertura e densidade da vegetação verde. Ou em outras palavras, o determinado valor em um índice de umidade como o LSWI, não varia somente em função do não alagamento de uma área, mas também das características biofísicas do dossel da vegetação.

Para análise exploratória dos índices espectrais e sua separabilidade em função do estado de inundação foram confeccionados primeiramente, gráficos de dispersão bidimensionais (*scatterplots*) para avaliar a influência da qualidade dos pixels sobre a separabilidade. Os gráficos foram desenvolvidos para dois conjuntos das imagens MODIS, uma vez filtradas pelo *pixel-reliability* de nível 0 e outra vez para o nível 0/1.

A análise exploratória também incluiu o cálculo da correlação de Spearman que expressa a relação entre duas variáveis (LSWI e EVI). Assim, para Bisquerra et al. (2004), a correlação é interpretada como relação existente entre duas variáveis, e/ou a variação concomitante entre estas duas variáveis.

Para análise exploratória das relações entre o índice de vegetação EVI e índice de umidade LSWI e escalonamento do LSWI em função do EVI foi efetuado também um agrupamento em quatro classes, utilizando uma Análise de Agrupamento (*k-mean cluster*).

A técnica de agrupamento por *k-mean* objetiva particionar (n) observações dentre *k-clusters*, onde cada observação pertence ao *cluster* mais próximo da média. Isso resulta em uma divisão do espaço de dados em um Diagrama de Voronoi.

Essa técnica de agrupamento gera um processo chamado de “k-médias” que parece dar partições que são razoavelmente eficientes no sentido de variância intraclasse. Além disso, este procedimento é facilmente programado e computacionalmente econômico, de modo que é possível processar grandes amostras.

Conforme MacQueen (1967), suas aplicações possíveis incluem métodos para similaridade de agrupamento como é o caso dos índices EVI e LSWI, previsão não

linear, aproximando distribuições multivariadas e testes não paramétricos de independência entre as múltiplas variáveis.

### 3.4.2 Regressão logística

A análise estatística da separabilidade entre áreas alagadas e não alagadas foi efetuado a partir de Regressões Logísticas, desenvolvidos para os dois conjuntos de dados inteiros (filtrados pelo *pixel-reliability* de 0 e 0/1) e para os mesmos conjuntos separados de acordo com as quatro classes obtidas pela Análise de Agrupamento (*k-mean cluster*).

O modelo de regressão logística tornou-se um método padrão de análise de regressão de dados dicotômicos, especialmente na área ambiental, conforme Lemeshow (1989) apud Bacani (2013).

A regressão logística (TSUCHIYA, 2002) é um modelo probabilístico que descreve a relação entre uma variável resposta e uma ou mais variáveis explicativas, apresentando resposta e uma ou mais variáveis explicativas, expondo a resposta de maneira sucinta, geralmente como um número ou uma série de números.

No campo da Estatística são definidos os significados, ou seja, a interpretação dos relacionamentos entre uma variável resposta, geralmente binária ou dicotômica e uma ou mais variáveis explicativas. Essa semelhança determina a probabilidade de ocorrência de um evento em presença de um conjunto de variáveis e explicativas, formando um modelo preditivo indutivo, no qual uma função é explicada por observações empíricas.

O resultado de um modelo baseado em uma regressão logística descreve a probabilidade de um evento estudado ocorrer, a probabilidade é representada por um valor entre 0 e 1 (SANTOS, 2007) assim a Regressão Logística pode ser definida de forma geral pela seguinte equação:

$$g(P_i) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i \quad 6$$

em que,  $g(P_i)$  é a função de ligação,  $P_i$  é a probabilidade de resposta para o  $i$ -ésimo fator (ou co-variante),  $\beta_i$  são coeficientes, e  $x_i$  são as variáveis independentes.

Na função de ligação do tipo *logit* com distribuição logística  $g(P_i)$  é dado por  $L(P_i)/1-(P_i)$ . É chamada “*odds ratio*” a razão  $P_i / 1-(P_i)$  que pode ser interpretada como probabilidade de um evento ocorrer.

Portanto, a regressão logística determina o impacto das diferentes variáveis independentes apresentadas simultaneamente para prever a adesão de uma ou de outra das duas categorias variáveis dependentes.

Depois de realizadas as regressões, foram analisadas as medidas de avaliação do modelo logístico – (log likelihood, Nagelkerke R2, Cox & Snell R Square), que são parâmetros padrões em regressão logística. O Nagelkerke R2 corresponde a medidas pseudos R-Quadrado que permitem avaliar se o modelo melhora ou não a qualidade das previsões, quando comparado a outro que ignore as variáveis independentes (FILHO, 2009).

De acordo com Bacani (2013), o coeficiente de Nagelkerke R2 representa uma correção do coeficiente de Cox & Snell R Square e segue a mesma interpretação, ou seja, quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade de modelo. Para Filho (2009) o Log Likelihood Value é um indicador que busca aferir a capacidade do modelo estimar a probabilidade associada à ocorrência de determinado evento, ou seja, verificar se a regressão como um todo é estatisticamente significativa. Como no modelo logístico a probabilidade máxima de um evento ocorrer é 1, o nível ideal para o Likelihood Value é zero, ou próximo de zero.

Com a estatística de Wald, esta também verifica o nível de significância correspondente para cada uma das covariáveis independentes do modelo, já para o nível de Significância quanto mais próximo de zero melhor explica o modelo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE O EVI E LSWI

A análise de correlação entre o EVI e LSWI de todos os pontos de extração de assinatura (n = 1952) do conjunto Reliability 0 (R\_0) das 23 datas analisadas no ano hidrológico de dezembro de 2007 até novembro de 2008, mostra uma baixa correlação de Spearman entre os dois índices, porém significativa conforme (Tabela 2). Obteve-se um resultado similar para o conjunto Reliability 1 (R\_0/1) com uma baixa correlação de Spearman.

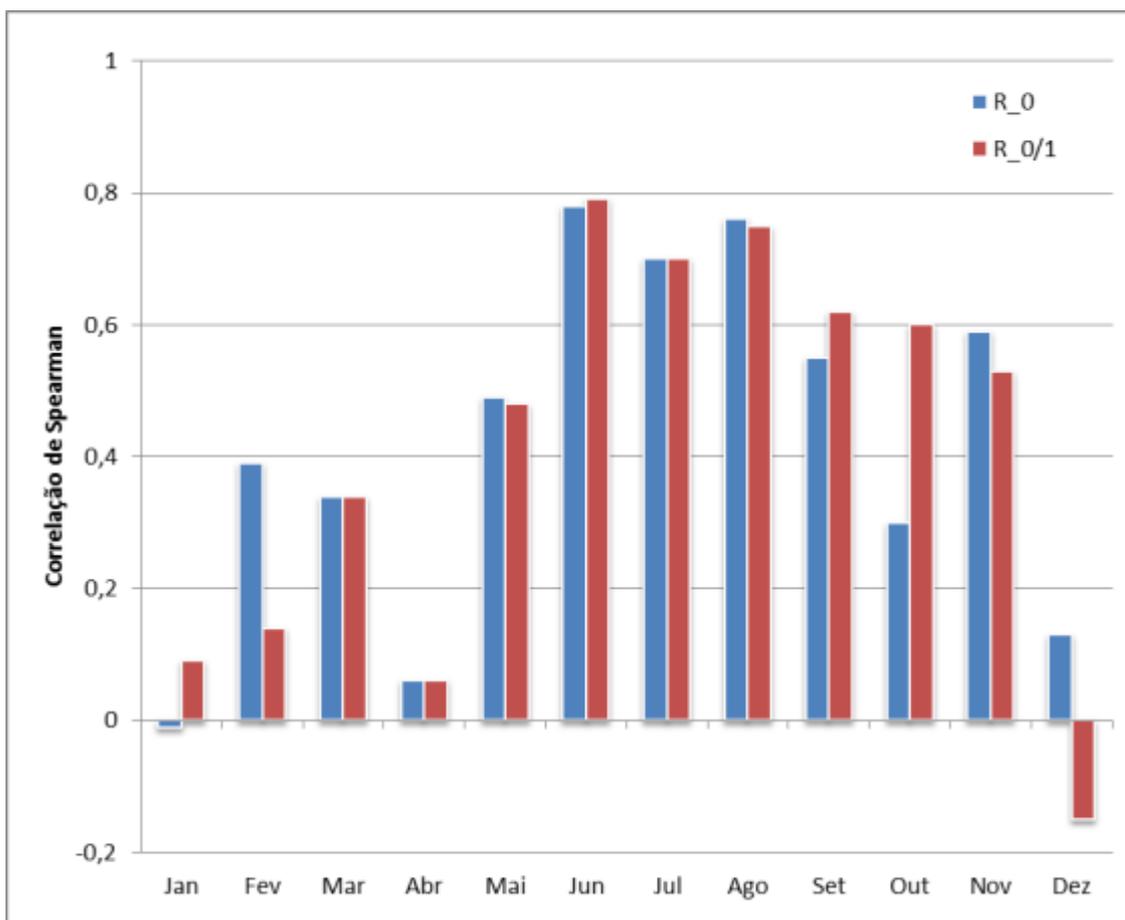
**Tabela 2** – Correlação de Spearman para EVI e LSWI para os 40 pontos (grade Pirizal - 23 datas entre dezembro 2007 até novembro de 2008).

		R_0		R_0/1	
		EVI	LSWI	EVI	LSWI
EVI	Spearman Correlação	1	,241**	1	,263**
	Significância		,000		,000
	N	1952	1952	2100	2100

\*\* Correlação significativa em um nível de 0.01.

Isso pode ser interpretado de tal forma que os dois índices representam características biofísicas e ambientais distintas e que, considerando que o LSWI representa características da umidade (inundação) da superfície ou do dossel, o índice varia fortemente em função do EVI, indicador da densidade da vegetação verde (HUETE et al., 2002).

Na análise das correlações de Spearman por mês (Figura 5) fica visível que a correlação é principalmente baixa ou até negativa (Janeiro para o conjunto R\_0; Dezembro para o conjunto R\_0/1) durante o período da cheia, enquanto a mesma aumenta durante o período sem inundação relevante (Junho até Setembro).



**Figura 5** - Correlação de Spearman entre os índices EVI e LSWI por mês e níveis de reliability 0 e 0/1

Podem ser consideradas duas possíveis razões para esta variação intranual da correlação. Em áreas alagadas a refletância nas bandas do Infravermelho Próximo é fortemente reduzida, modificando a razão normalizada entre o NIR e SWIR (LSWI) de forma mais expressiva em função do não alagamento do que o EVI, que inclui no seu cálculo além do NIR também bandas da faixa do visível.

Segundo Xiao et al. (2005), no período da seca a resposta de ambos os índices em áreas vegetadas é basicamente uma função do estado fisiológico do dossel e a sua evapotranspiração, interferindo assim de forma similar em ambos os índices. Já no período chuvoso, o sinal de “umidade” de formações vegetais, principalmente das quais com dossel não completamente fechado, é determinada também pela umidade/inundação da superfície do solo.

A correlação entre os dois índices dos conjuntos R\_0 e R\_0/1 é maior para o conjunto R\_0/1 no período com inundação. Isso indica que a interferência atmosférica tende a diminuir as diferenças entre os índices, principalmente em períodos que possuem maior contraste das respostas espectrais (áreas alagadas - não alagadas), prejudicando supostamente a qualidade da informação contida nas mesmas.

## 4.2 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

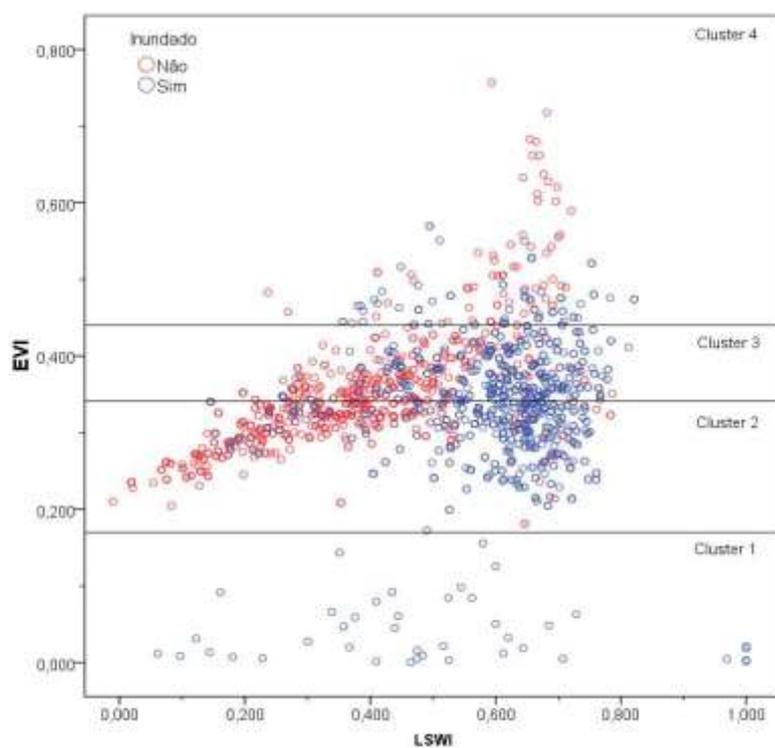
De acordo com a análise de correlação que mostrou a baixa relação entre o EVI e LSWI e como sugerido por Zeilhofer (2006), foi realizada análise de agrupamento (*k-mean cluster*) para escalonamento dos valores espectrais em quatro grupos de acordo com os valores de EVI.

Os centros do agrupamento e número de observação por classe de escalonamento expostos na tabela 3 mostram heterogeneidade expressiva nos números amostrais por classe, isso devido a variada cobertura vegetal na região. A mesma análise de agrupamento aplicada para R\_0/1 mostra heterogeneidade similar, também com valores altos para os *clusters* 2 e 3. Observa-se, entretanto que os centros dos sucessivos *clusters* possuem valores mais altos devido à influência de pixels com valores espectrais mais elevados devido à interferência atmosférica.

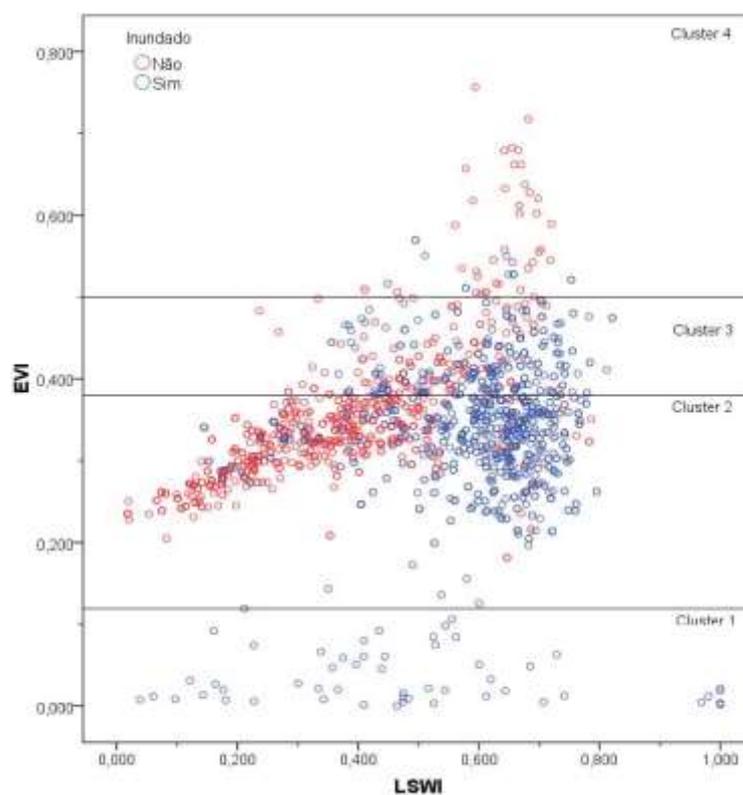
**Tabela 3** – Centros finais da Análise de Agrupamento do EVI para os níveis de Reliability 0 e 1 (R\_0, R\_0/1)

		Cluster			
		1	2	3	4
EVI (R_0)	Centro	,0687	,2977	,3798	,4925
	(min./max.)	( $\leq 0,18$ )	(0,18 – 0,35)	(0,35 – 0,45)	(0,45 – 0,75)
	n	52	967	766	167
EVI (R_0/1)	Centro	,2108	,3299	,4208	,5664
	(min./max.)	( $\leq 0,12$ )	(0,12 – 0,38)	(0,38 – 0,50)	(0,50 – 0,75)
	n	325	1196	523	56

Nas figuras 6 e 7 são visualizadas as relações entre os índices EVI e LSWI agrupamento (*scatterplot*) que são os limites entre os *clusters* para os níveis de confiabilidade R\_0 e R\_0/1, respectivamente. Aqui percebe-se que a separabilidade de pixels para estado de inundação e não inundação diminuiu fortemente em áreas que apresentam valores de EVI acima de 0,45, aproximadamente.



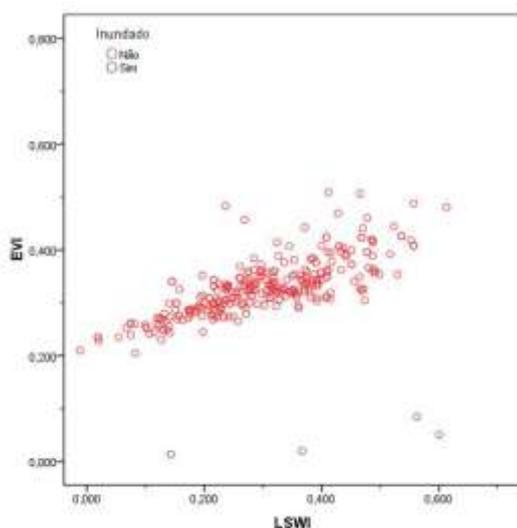
**Figura 6** - Relação entre índices EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o Reliability 0 ( $R_0$ ).



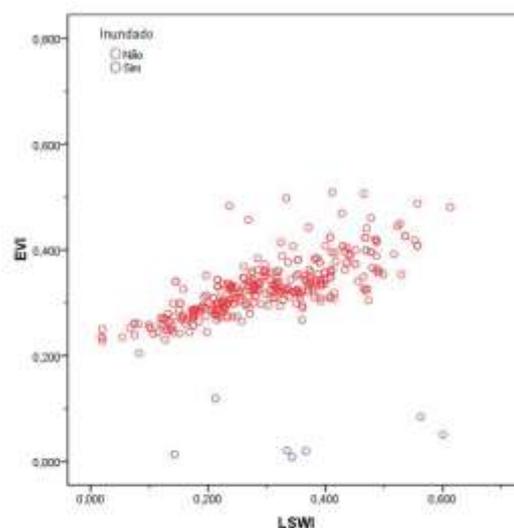
**Figura 7** - Relação entre índices EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o Reliability 0/1 ( $R_{0/1}$ ).

Os gráficos de dispersão (*scatterplot*) dos índices EVI e LSWI durante os meses de estiagem no Pantanal (julho, agosto e setembro) para R\_0 (Figura 8) e R\_0/1 (Figura 9) mostram que a inundação no Pantanal Norte é limitada ao período chuvoso. Permanecem inundados somente os corpos de água permanentes (EVI < 0,12).

Nessa época a diferenciação não é prejudicada pela inclusão de pixels com interferência atmosférica (R\_0/1, Figura 9).

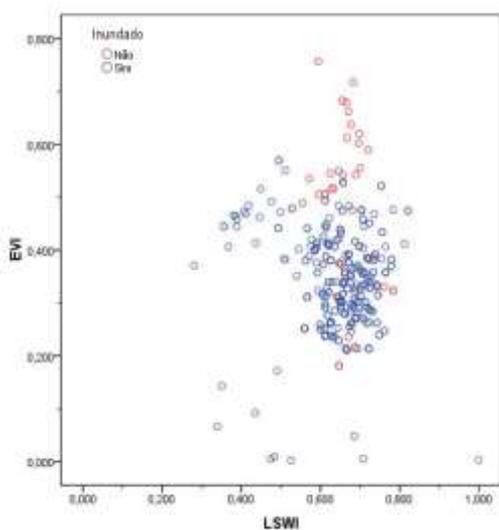


**Figura 8** - Relação entre índices EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o Reliability 0 (R\_0) nos meses de Julho, Agosto e Setembro.

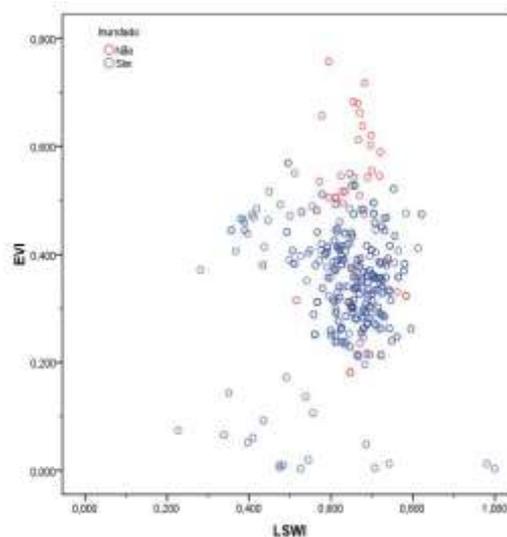


**Figura 9** - Relação entre índices EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o Reliability 0/1 (R\_0/1) nos meses de Julho, Agosto e Setembro.

Já para os meses chuvosos no Pantanal (meses de dezembro, janeiro e fevereiro) tanto para R\_0 (Figura 10) como para R\_0/1 (Figura 11) percebe-se que a área inundada predomina em relação à área não inundada. Os gráficos de dispersão indicam que ocorreria ambiguidade na diferenciação entre locais inundados e não inundados, principalmente para pontos amostrais com densidade da cobertura vegetal intermediária (tabela 4a).



**Figura 10** – Relação entre índices EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o Reliability 0 (R\_0) nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro.



**Figura 11** - Relação entre índices EVI e LSWI da análise de agrupamento para escalonamento de valores espectrais de acordo com o Reliability 0/1 (R\_0/1) nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro.

### 4.3 ANÁLISE DE REGRESSÃO LOGÍSTICA

#### 4.3.1 Modelos Regressão baseados somente no LSWI para R\_0 e R\_0/1

Os modelos de Regressão Logística (RL) baseados somente no índice LSWI (Tabela 4a e b) mostram acerto geral abaixo de 80% para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas (Tabela 5a- b).

**Tabela 4a.** - Coeficientes (B), Erro Padrão (S.E.) e Significância (Sig.) no modelo de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas a partir do índice LSWI (conjunto R\_0).

		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Passo 1 <sup>a</sup>	LSWI	8,816	,431	418,772	1	,000	6743,996
	Constante	-4,400	,233	357,106	1	,000	,012

a. Variável (s) introduzida no passo 1: LSWI.

**Tabela 4b.** - Coeficientes (B), Erro Padrão (S.E.) e Significância (Sig.) no modelo de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas a partir do índice LSWI (conjunto R\_0/1).

		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Passo 1 <sup>a</sup>	LSWI	8,693	,408	454,578	1	,000	5963,841
	Constante	-4,293	,220	381,824	1	,000	,014

a. Variável (s) introduzida no passo 1: LSWI.

Os acertos na classificação de pixels não inundados variam entre 73,9% (R\_0) e 73,5% (R\_0/1) e entre 83,2% (R\_0) e 83,9% (R\_0/1) para locais inundados.

**Tabela 5a-b.** – Matrizes de erro das regressões logísticas para diferenciação entre pontos amostrais secos (0) e inundados (1) para Reliability 0 (a) e Reliability 0/1 (b). R\_0 (-2 Log likelihood = 1727,923; Cox & Snell R Square = 0,322; Nagelkerke R Square = 0,429). R\_0/1 (-2 Log likelihood = 1861,008; Cox & Snell R Square = 0,322; Nagelkerke R Square = 0,430)

Observado		Previsão			Previsão		
		0	1		0	1	
Inundado	0	612	216	73,9	647	233	73,5
	1	152	755	83,2	160	833	83,9
Percentual total				78,8			79,0

a. O valor de corte é ,500

b. O valor de corte é ,500

O desempenho para os conjuntos R\_0 e R\_0/1 pode ser considerado equivalente, o que indica que para este tipo de mapeamento, não existe restrição no uso de pixels também com nível de Reliability de 0/1, o que aumenta o número de pixels classificados de 1952 (R\_0) para 2100 (R\_0/1). Os coeficientes *Nagelkerke R Square* que mostram a variação explicada pelo modelo, possuem da mesma forma valores muito similares com 0,429 para o conjunto R\_0 e 0,430 para o conjunto R\_0/1.

#### 4.3.2 Modelos Regressão baseados nos índices EVI e LSWI para R\_0 e R\_0/1

As tabelas 6 e 7 mostram os modelos de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas para os quatro agrupamentos separados e o modelo geral. Nestes modelos foram utilizados os índices EVI e LSWI para os conjuntos R\_0 (Tab. 6) e R\_0/1 (Tab. 7).

No conjunto R\_0, *cluster* 1 (baixa cobertura vegetal) é exclusivamente baseada na constante. Somente nos *clusters* 2 e 3, ambos índices são incluídos nos modelos.

No *cluster* 4, o EVI é suficiente de diferenciar entre pixels inundados e não inundados (tabela 6).

Já no conjunto R\_0/1 os modelos de RL dos *clusters* 1 e 3 são baseados em ambos os índices. No *cluster* 2 e 4, o LSWI e EVI, respectivamente são suficientes para a separação do estado de inundação (tabela 7).

**Tabela 6** - Modelos de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas para os quatro *clusters* separados e o modelo geral, utilizando os índices EVI e LSWI (conjunto R\_0).

R_0		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Cluster 1	Constante	3,045	,724	17,696	1	,000	21,000
Cluster 2	EVI	-8,599	3,592	5,731	1	,017	,000
	LSWI	12,458	,936	177,170	1	,000	257172,255
	Constante	-3,222	1,332	5,852	1	,016	,040
Cluster 3	EVI	-9,280	3,397	7,463	1	,006	,000
	LSWI	10,489	,639	269,272	1	,000	35927,917
	Constante	-2,169	1,081	4,029	1	,045	,114
Cluster 4	EVI	-17,813	4,611	14,921	1	,000	,000
	Constante	8,805	2,248	15,340	1	,000	6670,804
<b>Geral</b>	EVI	-9,732	,911	114,078	1	,000	,000
	LSWI	10,449	,484	466,953	1	,000	34524,616
	Constante	-1,790	,323	30,654	1	,000	,167

Observa-se que para o conjunto R\_0/1 (tabela 7) o desempenho dos coeficientes são considerados equivalentes para explicar o estado de inundação ou não inundação na área de estudo. O modelo mostra que os valores gerais apresentados tanto para EVI quanto para LSWI explicam a situação de inundação e/ou não inundação, quanto aos valores gerados nos agrupamentos (*clusters*) precisam do índice EVI para demonstrar a qualidade do modelo na classificação.

**Tabela 7** - Modelos de RL para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas para os quatro *clusters* separados e o modelo geral, utilizando os índices EVI e LSWI (conjunto R\_0/1).

R_0/1		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Cluster1	EVI	-25,324	4,760	28,301	1	,000	,000
	LSWI	10,418	1,214	73,646	1	,000	33452,613
	Constante	1,845	1,109	2,768	1	,096	6,326
Cluster 2	LSWI	8,365	1,016	67,808	1	,000	4292,929
	Constante	-4,275	,579	54,529	1	,000	,014
Cluster 3	EVI	-8,539	3,266	6,837	1	,009	,000
	LSWI	11,530	,637	327,273	1	,000	101711,310
	Constante	-2,876	1,079	7,105	1	,008	,056
Cluster 4	EVI	-18,750	8,715	4,628	1	,031	,000
	Constante	9,283	4,702	3,898	1	,048	10752,038
<b>Geral</b>	EVI	-10,157	,857	140,579	1	,000	,000
	LSWI	10,707	,474	510,444	1	,000	44669,469
	Constante	-1,716	,297	33,436	1	,000	,180

Os modelos de Regressão Logística (RL) baseados nos índices LSWI e EVI para os conjuntos R\_0 e R\_0/1 (Tab. 8) mostram para reliability 0 acerto geral 82% para diferenciação de áreas alagadas e não alagadas, já para a classe dos dois primeiros *clusters*, acertos de 86,8% e 100%, para os dois últimos *clusters* essa porcentagem foi de 80% e 66,7%. Se comparado estes valores do modelo com os valores gerais sem o modelo de regressão, o modelo de regressão logística explica melhor que em relação aos resultados gerais que ficam abaixo da porcentagem do modelo de regressão para explicar se está inundado e/ou não inundado a área de estudo.

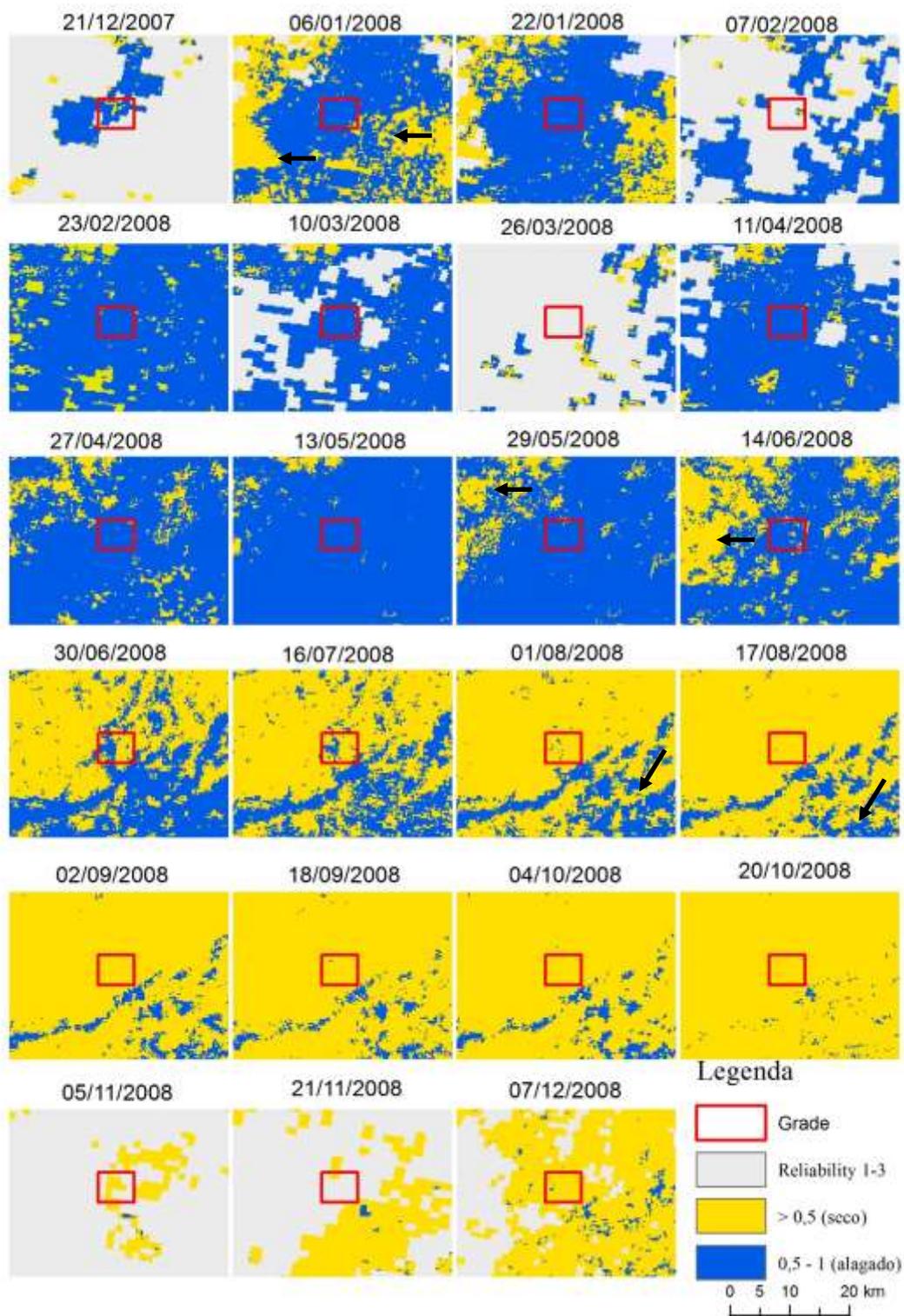
**Tabela 8** - Indicadores do desempenho dos modelos de RL com escalonamento em quatro *clusters* a partir do EVI/LSWI para Reliability 0 e 0/1.

Cluster	-2 Log likelihood R_0 / R_0/1	Cox & Snell R Square R_0 / R_0/1	Nagelkerke R Square R_0 / R_0/1	Acerto inundado R_0 / R_0/1	Acerto não inundado R_0 / R_0/1	Acerto geral R_0 / R_0/1
1	0,000 / 123,382	0,309 / 0,594	1,000 / 0,804	100,0 / 96,4	100,0 / 87,4	100,0 / 92,9
2	648,365 / 909,315	0,459 / 0,417	0,612 / 0,556	87,1 / 86,7	86,6 / 86,2	86,8 / 86,4
3	696,184 / 534,792	0,327 / 0,166	0,438 / 0,225	82,4 / 81,1	77,0 / 45,8	80,0 / 67,5
4	165,352 / 54,350	0,171 / 0,129	0,228 / 0,189	75,7 / 0,0	57,4 / 100,0	66,7 / 74,1
Geral sem cluster	1587,8 / 1683,3	0,374 / 0,384	0,500 / 0,512	83,7 / 83,5	80,1 / 79,8	82,0 / 81,7
Geral	-	-	-	<b>79,95 / 79,55</b>	<b>84,56 / 84,24</b>	<b>82,36 / 82,03</b>

Para o conjunto R\_0/1 mostram para pixels com confiabilidade 1 o acerto geral é de 81,7%. Para este conjunto de dados às porcentagens gerais ou dos *clusters* foram menores que em relação aos do conjunto R\_0, mas não são descartados por serem similares e também por explicarem através do modelo de regressão se a área de estudo está inundada e/ou não inundada. Este modelo de regressão também explicou melhor a inundação e a não inundação que os valores gerais sem a aplicação da regressão logística.

A figura 12 apresenta o mapa da dinâmica de inundação em uma área de cerca de 1000 km<sup>2</sup> no Pantanal norte, ao redor da grade SALD Pirizal, ilustrada a partir da classificação por Regressão Logística das 23 imagens do ciclo hidrológico de dezembro de 2007 a novembro de 2008.

Devido a densa cobertura de nuvens (21/12/2007) a série não permitiu uma clara identificação em qual setor iniciou-se a inundação. Pode-se supor porém, que as primeiras áreas inundadas se concentraram ao norte/nordeste do recorte em áreas mais altas da planície (perto da Depressão Cuiabana), causadas por eventos locais de precipitação. No início de dezembro o rio Cuiabá ainda não alcançava níveis suficientemente altos para garantir um alagamento da planície. Ainda na segunda imagem classificada (06/01/2008), algumas áreas de influência imediata do rio Cuiabá (flechas pretas) permaneceram secas.



**Figura 12** – Mapa da dinâmica de inundação na área de estudo grade SALD Pirizal.

A maior extensão da inundação no ciclo monitorado foi detectada para a imagem de 13/05/2008. O retrocesso do alagamento se iniciou no noroeste do recorte, partindo de um leque aluvial mais alto, unidade de paisagem predominada por Campos de Murundus (29/05 e 14/06/2008).

Áreas ao sul do rio Cuiabá permaneceram alagadas até o pico do período seco (01/08 e 17/08/2008). Na última imagem (07/12/2008) surgiram os primeiros alagamentos do novo ano hidrológico.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível caracterizar a inundação na área da grade SALD Pirizal, utilizando o produto MOD13Q1 do MODIS avaliando sistematicamente a influência dos fatores limitantes como densidade da cobertura vegetal e a presença de nuvens no período chuvoso sobre o resultado do mapeamento através dos índices EVI e LSWI.

Os resultados obtidos através de Regressão Logística permitiu a separação de áreas inundadas das não inundadas em função da cobertura vegetal. Assim a influência da qualidade dos pixels do MODIS no desempenho da diferenciação das áreas alagadas e não alagadas ficou evidente nos modelos de regressão, pois piorava estatisticamente quando passava os dados por filtros de vegetação (*clusters*).

Os modelos mostraram que os valores gerais são satisfatórios tanto para EVI quanto para LSWI, mas quanto aos valores gerados nos *clusters* precisam do índice EVI para demonstrar a qualidade do modelo na classificação para se obter um monitoramento da área em estudo mais representativo da realidade. Além disso, ficou claro que não houve uma diferença significativa nos valores da análise de pixels puros (R\_0) para pixels misturados (R\_0/1).

Considerando as conhecidas limitações de sensores óticos para detecção de alagamento em áreas vegetadas, os índices EVI e LSWI do MODIS mostraram-se eficientes para o monitoramento de áreas alagadas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÁMOLI, J. **Bases para uma política comum de conservação das terras úmidas do Pantanal e do Chaco**. Corumbá: CPAP/Embrapa, 2000. Disponível em: <<http://www.cpap.embrapa.br/agencia/congresso/Socio/ADAMOLI-91.pdf>>.

Acesso em: 20 março 2013.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; JÚNIOR, O. A. C. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marciana/2003/12.11.08.55/doc/publicacao.pdf>>.

Acesso em: 01 setembro 2013.

ANDRADE, N. S. O. **Qualidade geométrica de imagens JERS-1 (SAR) e Radarsat (modos S2 e S3) em ambiente de floresta tropical (Rondônia)**. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: INPE, 1999.

BACANI, D. A. **Análise espaço-temporal da malária no estado de Mato Grosso no período de 2003 a 2009**. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Departamento de Geografia, Universidade de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

BISQUERRA, R.; SARRIERA, J. C.; MARTÍNEZ, F. **Introdução à estatística: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS**. Tradução Fátima Murad – Porto Alegre: Artmed, 2004.

CHANDRASEKAR, K.; SETHA, M. V. R.; ROY, P. S.; DWEVEDI, R. S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. **International Journal of Remote Sensing**. v. 31, pg. 33987-4005, 2010.

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, pg. 225-236, 2005.

COSTA, M.; NOVO, E.; AHERN, E.; MITSUO, E.; MANTOVANI, J.; BALLESTER, M.; PIETSCH, R. The Amazon flood plain through Radar eyes: Lago Grande de Monte Alegre case study. **Canadian Journal of Remote Sensing**. v. 24, pg. 339–349, 1998.

DANTAS, M. S.; ROSA, R. R.; CALHEIROS, D. F.; VERONESE, T. B.; LIMA, I. B. T.; HAMILTON, S. K. Análise espectral de dados SMMR para estudo de padrões de inundação do Pantanal. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 14, 2009, Natal. **Anais**. Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p. 4701-4706.

DARCH, J. P. A study of moisture conditions in the Pantanal of Brazil using satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**. v.8, pg. 331-348, 1979.

FANTIN-CRUZ, I. **Dinâmica da inundação em meso-escala na planície de inundação do rio Cuiabá, Pantanal - Brasil**. 2008. 28 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação da Biodiversidade) - Instituto de Biociências, Programa de Pós Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2008.

FANTIN-CRUZ, I.; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P.; COLLISCHONN, W. & CUNHA, C. N. Unidades fitofisionômicas em mesoescala no Pantanal Norte e suas relações com a geomorfologia. **Biota Neotropica**. v. 10, pg. 31-38, 2010.

FANTIN-CRUZ, I.; PEDROLLO, O.; CASTRO, N. M. R.; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P.; HAMILTON, S. K. Historical reconstruction of floodplain inundation in the Pantanal (Brazil) using neural networks. **Journal of Hydrology**. v. 399, pg. 376-384, 2011.

FERNANDES, M. I.; SIGNOR, C. A.; PENHA, J. **Biodiversidade no Pantanal de Poconé**. 1. ed. Cuiabá, MT: Attema, 2010. 196 p.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de Sensoriamento Remoto**. Brasil: CONAB, 2005. Disponível em:

<[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos\\_s m.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_s m.pdf)>. Acesso em: 19 abril 2013.

FILHO, J. M. D.; CORRAR, L. J. **Análise multivariada: para cursos de Administração, Ciências Contábeis, Atuariais e Financeiras**. FIPECAFI – Fundação e Instituto de Pesquisas Contábeis, Atuariais e Financeiras, São Paulo: Atlas, 2009.

FRANÇA, A. M. S. **Aplicação de sensoriamento remoto no estudo da influência da dinâmica sazonal do rio Amazonas sobre a morfologia dos sistemas lacustres**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, 2005.

FRAZIER, P. S.; PAGE, K. J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.66, pg. 1461-1468, 2000.

GAO, B-C. Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. **Remote Sensing of Environment**. v. 58, pg. 257-266, 1996.

GOLTZ, E.; BRANDÃO, D.; TOMÁS, L.; MANTELLI, L. R.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R. Utilização de índices espectrais de vegetação do sensor MODIS na determinação de áreas susceptíveis a alagamento no Pantanal Sulmatogrossense. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 01, pg. 35-44, 2007.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, pg. 195-213, 2002.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 1. ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.598 p.

JUNK, W. J.; BAILEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Can. J. Fish. aquat. Sci.** v. 106, pg. 110-127, 1989.

KAWANISHI, T.; SEZAI, T.; ITO, Y.; IMAOKA, K.; TAKESHIMA, T.; ISHIDO, Y.; SHIBATA, A.; MIURA, M.; INAHATA, H.; SPENCER, R. W. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for Global Energy and Water Cycle Studies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**.v.41, pg. 184-194, 2003.

KIDDER, S. Q.; GOLDBERG, M. D.; ZEHR, R. M.; DEMARIA, M.; PURDOM, J. F. W.; VELDEN, C. S.; GRODY, N. C.; KUSSELSON, S. J. Satellite Analysis of Tropical Cyclones Using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 81, pg. 1241-1289, 2000.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; JÚNIOR, O. A. C. **Sensor MODIS: características gerais e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10482/11077>> Acesso em: 01 setembro 2013.

MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. 1, 1967, University of California Press.

(MacQueen, J. B. (1967). "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations". {{{booktitle}}}).

MAGNUSSON, W.E.; LIMA, A.P.; LUIZÃO, R.; LUIZÃO, F.; COSTA, F.R.C.; CASTILHO, C.V.; KINUPP, V.F. RAPELD: A modification of the Gentry method for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**. v. 5, pg. 19-24, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bn/v5n2/v5n2a01.pdf>> Acesso em: 01 dezembro 2013.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; ROSA, A. N. C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B.; BAPTISTA, G. M. M.; BRITES, R. S. **Introdução ao processamento de imagens**

**de sensoriamento remoto.** Brasília: INPE, 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-9693e4f69d8>>.

Acesso em: 27 abril 2013.

MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). Arizona: NASA, 2010. 38p. (Version 2.0 Collection 5). Vegetation Index and Phenology Lab.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V. Imagens de coeficiente de qualidade (Quality) e de confiabilidade (Reliability) para seleção de pixels em imagens de NDVI do sensor MODIS para monitoramento da cana de açúcar no estado de São Paulo. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 15, 2011, Curitiba. **Anais.** Curitiba: SBSR, 2011. p. 0547-0552.

NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). MOD13Q1. USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, 2010.

NEIFF, J. J. **Planícies de inundação são ecótonos?** Argentina: (CECOAL) – CONICET, 1999. Disponível em: <<http://www.neiff.com.ar/documentacion/03.%20Capitulos%20de%20libro/ARCHIVO%2035.%20Neiff,%202003.pdf>>. Acesso em: 02 fevereiro 2013.

OLIVEIRA, T. H.; MACHADO, C. C. C.; SILVA, J. S.; GALVÍNIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M.; SILVA, B. B. Índice de umidade (NDWI) e análise espaço-temporal do albedo de superfície da bacia hidrográfica do rio Moxotó - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física.** v. 03, pg. 55-69, 2010.

OLIVEIRA, G. V. **Análise do Coeficiente de Retroespalhamento de Áreas Inundadas.** 2013. 76 F. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

PADOVANI, C. R. **Dinâmica Espaço-Temporal das Inundações do Pantanal.** 2010. 174 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de

Agricultura “Luiz de Queiroz”, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; BATES, P. D.; BAUGH, C. The influence of vertical water balance on modelling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics. **Hydrological processes**. Publicado online Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.9897, p. 366-374, 2005.

SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3-4, p. 366-374, 2005.

SAKAMOTO, T.; NGUYEN, N. V.; KOTERA, A.; OHNO, H.; ISHITSUKA, N.; YOKOZAWA, M. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. **Remote Sensing of Environment**. v. 109, pg. 295-313, 2007.

SANTOS, E. S. **Modelos espaço-temporais de habitats de *Anopheles darlingi* na área de influenciada APM – Manso - MT**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Departamento de Geografia, Universidade de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

SAUSEN, T. **Sensoriamento Remoto: Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas**. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <[http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/11.08.13.16/doc/08\\_Sensoriamento\\_remoto.pdf](http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/11.08.13.16/doc/08_Sensoriamento_remoto.pdf)>. Acesso em: 17 janeiro 2013.

SIPPEL, S. J.; HAMILTON, S. K.; MELACK, J. M.; CHOUDHURY, B. J. Determination of inundation area in the Amazon River floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. **Remote Sensing of Environment**. v. 48, pg. 70-76, 1994.

SIPPEL, S. J.; HAMILTON, S. K.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. M. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. **Remote Sensing of Environment**. v. 19, pg. 3055-3074, 1998.

TEIXEIRA, S. G. **Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras**. 2011. 105 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

TSUCHIYA, I. **Regressão logística aplicada na análise espacial de Dados arqueológicos**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2002.

XIAO, X.; BOLES, S.; FROLKING, S.; SALAS, W.; MOORE III, B.; LI, C. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using Vegetation sensor data. **International Journal of Remote Sensing**. v. 23, pg. 3009-3022, 2002.

XIAO, X.; ZHANG, O.; SALESKA, S.; HUTYRA, L.; CAMARGO, P.; WOFSY, S.; FROLKING, S.; BOLES, S.; KELLER, M.; MOORE III, B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. **Remote Sensing of Environment**. v. 94, pg. 105-122, 2005.

XIAO, X.; BOLES, S.; FROLKING, S.; LI, C.; BABU, J. Y.; SALAS, W.; MOORE III, B. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**. v. 100, pg. 95-113, 2006.

ZEILHOFER, P. Soil mapping in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil, using multitemporal Landsat TM data. **Wetlands Ecology and Management**. v. 14, pg. 445-461, 2006.