



**ESTIMATIVA DA BIOMASSA FLORESTAL A PARTIR DO USO DE
IMAGENS *RAPIDEYE* E *LANDSAT***

NATÁLIA OLIVEIRA RAMOS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

ESTIMATIVA DA BIOMASSA FLORESTAL A PARTIR DO USO DE IMAGENS *RAPIDEYE* e *LANDSAT*

Natália Oliveira Ramos

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como Requisito Parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Florestal.

Orientador: Msc. Milton Serpa de Meira Junior

Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Rodrigues Pinto

BRASÍLIA/DF,
DEZEMBRO DE 2017

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pelo seu infinito amor e cuidado. Aos meus pais por todo o apoio durante a caminhada e aos meus tios João e Adriana, pelo cuidado e atenção que sempre tiveram comigo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por seu eterno cuidado com minha vida, pelas pessoas maravilhosas que ele colocou no meu caminho e que contribuíram para meu amadurecimento enquanto pessoa e enquanto profissional.

Agradeço ao meu orientador Milton por ter aceitado me orientar, por sua paciência, atenção e cuidado, pelos conselhos acadêmicos e por ter acompanhado assiduamente todas as etapas deste trabalho, estando sempre disponível. Ao meu orientador José Roberto por ter aceitado me orientar, por ter fornecido os dados do inventário, por ter me dado a oportunidade de conhecer a Floresta de Vale do Véu de Noiva e o trabalho que há tantos anos desenvolve com esta área, e por ter tido o cuidado de ler meu trabalho inúmeras vezes, sempre contribuindo para sua melhora. Ao professor Eraldo por toda a paciência em me auxiliar no processamento das imagens e por ter estado sempre disponível para me ajudar, além de todas as contribuições na melhora deste trabalho. Ao professor Eder por todas as sugestões que contribuíram para o aperfeiçoamento do estudo. Aos professores que fizeram parte da minha graduação e que contribuíram para que eu chegasse até aqui e aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal.

Agradeço aos meus pais por terem me motivado, acreditado na minha capacidade, e por terem abdicado de muitas coisas para que eu pudesse concluir este curso. Aos meus tios João e Adriana, por terem acompanhado e apoiado minha graduação e a todos os meus familiares. Aos meus colegas de apartamento (e irmãos de coração) Bruna, que está comigo desde sempre, e ao meu primo Pedro por todas as palavras de motivação, pela paciência e por todas as risadas que demos juntos.

Ao meu amigo Santiago pela companhia diária e por todas as alegrias e desesperos que vivemos durante a graduação. A minha amiga Annie por seu cuidado, pelos muitos conselhos que trocamos sobre vida acadêmica e pessoal e pela amizade que desenvolvemos nesse caminho. Ao meu amigo Glendo pelo cuidado de irmão que sempre teve comigo e por me inspirar a buscar cada dia mais sobre novas áreas do conhecimento. Ao meu amigo Lucas, que mesmo distante, sempre acreditou na minha capacidade e me motivou nos momentos de dificuldade. Ao meu amigo Hans, por acreditar em mim quando eu mesma duvidei. As minhas amigas Luísa, Isabel, Juliana, Gabrielle, Maria Clara e Marina, pelas orações, pelos conselhos e risadas, obrigada, vocês são exemplos do cuidado de Deus pela minha vida. Aos meus pastores Ilmar e Nene e aos demais amigos da Igreja por todas as orações e palavras de motivação.

Aos meus amigos e colegas de graduação, obrigada pela caminhada, eu não chegaria aqui sem vocês!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO.....	vii
1) INTRODUÇÃO	8
2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1) Biomassa vegetal	9
2.2) Uso do sensoriamento remoto na estimativa da biomassa vegetal.....	10
3) OBJETIVOS	13
3.1) Objetivo Geral.....	13
3.2) Objetivos Específicos.....	13
4) MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4.1) Área de estudo	13
4.2) Inventário Florestal	15
4.3) Índices de vegetação e reflectâncias espectrais	16
4.4) Ajuste do modelo	18
5) RESULTADOS.....	19
6) DISCUSSÃO	25
7) CONCLUSÃO	27
8) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
ANEXO	33

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (PNCG), Mato Grosso – Brasil e o perfil tridimensional do Vale do Véu de Noiva, indicando as três transeções de amostragem da vegetação (I, II e III). Fonte: Pinto (2002).14
- Figura 2.** Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa aérea lenhosa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Rapideye para a vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT. (Res = Biomassa estimada – Biomassa observada).....22
- Figura 3.** Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa aérea lenhosa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM para a vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT. (Res = Biomassa estimada – Biomassa observada)23
- Figura 4.** Distribuição da biomassa aérea lenhosa da vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT, obtida a partir da aplicação do modelo ajustado a partir do índice Razão Simples (Simple Ratio) derivado da imagem do satélite Landsat 5 TM.24

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Biomassa aérea lenhosa total estimada por parcela em kg para a vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães – MT, com base em dados do inventário de campo.....19
- Tabela 2.** Correlação entre os índices de vegetação e a biomassa aérea lenhosa da vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT. Acima da diagonal encontram-se as correlações entre os índices derivados das imagens do satélite Landsat 5 TM e abaixo da diagonal entre os índices derivados das imagens do RapidEye. * Significativa a 95% de probabilidade.....20
- Tabela 3.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, estatística de ajuste e precisão: erro absoluto (Syx), erro relativo (Syx %) e coeficiente de determinação (R^2) para os índices derivados da imagem do satélite RapidEye * Significativos a 5% de significância.....21
- Tabela 4.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, estatística de ajuste e precisão: erro absoluto (Syx), erro relativo (Syx %) e coeficiente de determinação (R^2) para os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM *Significativos a 5% de significância.21

RESUMO

A vegetação desempenha papel fundamental no ciclo do gás carbônico, pois são sumidouros naturais de CO₂ em função de sua capacidade em fixá-lo na forma de biomassa vegetal. A contribuição das florestas no balanço do carbono é feito através da avaliação do estoque da biomassa florestal. Os métodos de estimativa da biomassa florestal são dispendiosos e são inviáveis em áreas onde não é possível fazer o corte dos indivíduos arbóreos. Como alternativa existem variáveis de fácil obtenção que podem auxiliar na estimativa da biomassa florestal, por exemplo, altura, diâmetro, densidade, área basal e dados de sensoriamento remoto, como os índices de vegetação. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar a relação entre a biomassa aérea lenhosa obtida do inventário florestal e dados de sensoriamento remoto utilizando imagens orbitais *RapidEye* e do satélite Landsat 5 TM. Para isto, foi calculada a biomassa aérea lenhosa acima do solo em 18 parcelas de 600 m², na Floresta de Vale do Véu de Noiva (FVVN), localizada na Chapada dos Guimarães – Mato Grosso. Do mesmo modo, foram estimados índices de vegetação médio e a reflectância espectral média para as respectivas parcelas obtidos a partir de dados de sensores orbitais dos satélites *RapidEye* e do satélite Landsat 5 TM. Foram determinadas as correlações entre a biomassa lenhosa, índices de vegetação (*Enhanced Vegetation Index*, *Normalized Difference Vegetation Index* e *Simple Ratio Index*) e reflectância espectral na banda do infravermelho próximo. Também foi ajustada equação de regressão simples utilizando a biomassa lenhosa como a variável dependente (Bi), as reflectâncias espectrais e os índices de vegetação médios de cada parcela como a variável independente (IV). Foi encontrada correlação significativa entre os índices de vegetação obtidos a partir de dados do satélite Landsat 5 TM e do satélite *RapidEye*. Os índices derivados das imagens do satélite Landsat 5 TM apresentaram maiores correlações com a biomassa lenhosa acima do solo. Entretanto, a correlação encontrada entre os índices de vegetação e a biomassa lenhosa não foi suficiente para ajustar modelos de alta precisão, sendo o índice de Razão Simples o único índice estatisticamente significativo para estimar a biomassa, comparando com dados de campo.

Palavras-chave: Biomassa aérea, Floresta de Vale do Véu de Noiva, Índices de vegetação, Floresta de Vale, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Sensoriamento Remoto.

1) INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas refletidas no aumento da temperatura global são uma das principais consequências do “efeito estufa” (IPCC, 2007). Ele é ocasionado em função do aumento das emissões de CO₂ pelo uso de combustíveis fósseis e mudanças no uso e cobertura do solo (SOLOMON et al., 2007). Uma das alternativas apontadas para a redução do efeito estufa está na remoção e na fixação do gás carbônico na biosfera terrestre (IPCC, 2007). Ele pode ser capturado da atmosfera pelas plantas a partir da fotossíntese (IPCC, 2005).

As florestas possuem relevante papel no ciclo do gás carbônico, pois são consideradas importantes sumidouros de carbono, devida à sua capacidade em fixar carbono na forma de biomassa (SANQUETTA et al., 2014). Portanto, é necessário entender o papel dos ecossistemas florestais e sua contribuição no balanço de carbono e face ao aquecimento global uma das formas de quantificar a contribuição das florestas no balanço do carbono é através da avaliação da biomassa vegetal (SANQUETTA; DALLA CORTE; BENEDET MAAS, 2011).

A biomassa florestal pode ser determinada através de métodos diretos e indiretos (SANQUETTA, 2002). Os métodos diretos são aqueles onde a biomassa é determinada de forma destrutiva, já os indiretos fazem uso de equações alométricas (SOARES; TOMÉ, 2004) onde a biomassa determinada de forma destrutiva é associada através do ajuste de modelos às variáveis de campo de mais fácil obtenção, como altura, diâmetro (SANQUETTA; CORTE; DA SILVA, 2011) e densidade da madeira (FEARNSIDE, 1997).

Mesmo com estas variáveis de fácil obtenção em campo, a mensuração da biomassa é dispendiosa (BROWN; LUGO, 1984; HIGUCHI; SANTOS; RIBEIRO, 1998). Assim, se faz necessário buscar variáveis de menor custo de obtenção que estejam relacionadas à biomassa vegetal. As técnicas de sensoriamento remoto são ferramentas viáveis para quantificar a biomassa em função de sua relação com a atividade fotossintética (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Uma destas ferramentas é o uso de índices de vegetação, a qual é outra variável de fácil obtenção e está correlacionada à biomassa vegetal (PAN et al., 2013). A área basal também é altamente correlacionada com a biomassa florestal (BRIENEN et al., 2015), entretanto, sua mensuração depende de avaliações em campo.

Relacionar dados de campo com dados de sensoriamento remoto é uma das alternativas viáveis para o estudo da biomassa florestal (FERRAZ et al., 2014; SARMIENTO; PINILLOS; GARAY, 2005). No presente estudo, buscou-se avaliar a relação entre a biomassa vegetal e dados de imagens de satélite para desenvolver procedimentos metodológicos e baixo custo e ajustes de equações que permitam estimar a biomassa vegetal e entender sua distribuição no espaço e, indiretamente, o estoque de carbono nas formações vegetais.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) Biomassa vegetal

As florestas tropicais desempenham papel fundamental no ciclo do carbono que é o de sequestro e fixação de CO₂ através do processo de fotossíntese (ALVES et al., 2010). Elas são responsáveis por 92% de toda a biomassa terrestre (PAN et al., 2013). A função das florestas tropicais no ciclo global do carbono é dependente de sua extensão, da quantidade de carbono orgânico armazenado na forma de matéria orgânica, taxa de fixação através da fotossíntese e troca de carbono entre outros ecossistemas (BROWN; LUGO, 1984). Portanto, a dispersão das florestas e sua produtividade determinam a distribuição da biomassa terrestre (PAN et al., 2013).

A biomassa é definida como toda a matéria orgânica, morta ou viva, encontrada acima e abaixo do solo, presente nos organismos (BROWN; LUGO, 1982), por exemplo, nos vegetais. A biomassa florestal é composta por tronco, galhos, folhas, sementes, raízes e cascas (BROWN; LUGO; CHAPMAN, 1986; HIGA et al., 2014), sendo que cerca de 50% da biomassa presente nos reservatórios florestais é composta por carbono (BROWN; LUGO, 1984; CHAVE et al., 2005; LACERDA et al., 2009). Sendo as florestas grandes acumuladoras de biomassa terrestre, logo, a quantificação desta biomassa nos ecossistemas é de fundamental importância para compreender sua função dentro do ciclo do carbono (SANQUETTA, 2002) e seu papel enquanto mitigadoras do aquecimento global (FAO, 2012).

A maioria dos métodos utilizados para quantificar a biomassa vegetal utiliza técnicas destrutivas e de baixa viabilidade em áreas naturais. A principal técnica destrutiva para a estimativa de biomassa é a pesagem do indivíduo (HIGUCHI et al., 1994). Desta forma, essa técnica requer o abate de árvores na floresta, o que não é

viável em áreas de difícil acesso ou que estão protegidas por lei. Assim, é necessário buscar variáveis alternativas a este método que possibilitem a estimativa da biomassa, como diâmetro, altura e densidade (SOMOGYI et al., 2007). A variável que mais se relaciona a estimativa indireta da biomassa em ambientes florestais é a altura da árvore, porém a área basal dos indivíduos também possui fortes relações com a biomassa lenhosa (BRIENEN et al., 2015; PAN et al., 2013)

2.2) Uso do sensoriamento remoto na estimativa da biomassa vegetal

A observação da superfície terrestre através de imagens de satélites é uma das técnicas mais econômicas e efetivas utilizadas para fazer análises espaciais de extensas áreas (FELIX; KAZMIERCZAK; ESPINDOLA, 2009). Esta técnica só foi possível em função do desenvolvimento do Sensoriamento Remoto, que é a ciência que visa o desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de imagens da superfície terrestre através da detecção e medição quantitativa do resultado da interação da radiação eletromagnética com os alvos terrestres (MENESES et al., 2001). O resultado da interação do espectro eletromagnético com os alvos terrestres ao longo de suas faixas espectrais é conhecido como reflectância espectral (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

A reflectância espectral da vegetação que é captada pelo sensor do satélite é resultado da interação da luz com o dossel florestal (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Esse comportamento espectral é dependente da estrutura da vegetação, onde a radiação eletromagnética interage com os pigmentos presentes nos cloroplastos das folhas, com seu conteúdo de água e com a própria estrutura do mesófilo (GATES et al., 1965). Desta forma, o resultado da interação da luz com a vegetação captado por meio de sensores remotos reflete parâmetros biofísicos da vegetação que estão relacionados ao processo de fotossíntese (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012) que é o principal responsável pela fixação de carbono na forma de biomassa vegetal.

A utilização de bandas espectrais que se relacionam à atividade fotossintética se constitui como variáveis de interesse para entender a biomassa vegetal de uma região de maneira indireta (CASSOL; SALDANHA; KUPLICH, 2013). As áreas do espectro eletromagnético de maior interesse são aquelas onde a vegetação mais absorve energia para realizar a fotossíntese, como na do visível (0,4 a 0,72 μm) (ASHRAF et al., 2016).

A região do infravermelho próximo (0,72 a 1,10 μm) também pode ser viável em função de que a reflectância captada pelo sensor nesta faixa do espectro reflete o estado físico da vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

As regiões do visível e do infravermelho próximo apresentam correlação significativa entre as assinaturas espectrais da vegetação com a biomassa vegetal (MUUKKONEN; HEISKANEN, 2005; ROY; RAVAN, 1996). O Infravermelho Próximo (NIR, *Near Infrared*) é a região do espectro eletromagnético que abrange o intervalo entre 0,7 a 1,3 μm , onde há baixa absorção da radiação pela vegetação e elevado espalhamento feito pela estrutura interna das folhas (MENESES et al., 2001).

Diversos índices de vegetação foram desenvolvidos tendo como premissa a relação destes comprimentos de onda do espectro eletromagnético com a atividade fotossintética (MENEZES et al., 2012). O sensoriamento remoto permite compreender o funcionamento da vegetação em maior escala, estando correlacionado às propriedades microscópicas dos indivíduos arbóreos que se relacionam ao processo de fotossíntese e indiretamente a fixação de carbono na forma de biomassa (KUMAR et al., 2015). Uma alternativa para avançar nos estudos de monitoramento da biomassa florestal nas áreas naturais é utilizar dados de sensores remotos (LU, 2006), por meio da estimativa de índices da vegetação (WATZLAWICK et al., 2009).

Os índices de vegetação são conversões de duas ou mais faixas espectrais que refletem parâmetros biofísicos da vegetação, como atividade fotossintética e estrutura de dossel (HEUTE et al., 2002). Tais índices são obtidos através dos valores radiométricos presentes em cada pixel da imagem (MENEZES et al., 2012). Devido a este vínculo com a atividade fotossintética da vegetação, eles contribuem de forma indireta para entender a distribuição de biomassa nos ambientes naturais (LU, 2006). Diversos índices são utilizados para avaliar a vegetação, como o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI, *Soil-adjusted vegetation Index*), o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*), o Índice de Realce da Vegetação (EVI, *Enhanced Vegetation Index*) e o Índice de Razão Simples (SR, *Simple Ratio*), sendo o NDVI, o EVI e o SR os mais utilizados (JENSEN, 2009).

O índice SR foi desenvolvido por Birth e Mcvey (1968) e é apontado como um dos primeiros índices de vegetação verdadeiro. O SR é um dos índices mais sensíveis a variação de biomassa em áreas onde há elevado acúmulo de biomassa em função de ser obtido através da razão entre a reflectância do infravermelho próximo e vermelho

(JENSEN, 2009). A principal limitação deste índice está no fato de que, como ele não é normalizado, ele não permite comparação entre áreas (MENESES et al., 2001).

O NDVI foi desenvolvido por Rouse et al. (1973). Este índice é sensível à presença de clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção de luz na banda do vermelho, além de refletir o estado sadio da vegetação em função da utilização do infravermelho próximo no seu cálculo, ele é o índice que mais se relaciona à biomassa vegetal (MENEZES et al., 2012). O NDVI apresenta picos de saturação em áreas de acúmulo de biomassa, o que o torna pouco sensível à detecção de variações no aumento da biomassa vegetal a partir de determinada fase de crescimento das plantas (HONGJUN et al., 2007). Tal acúmulo de saturação se dá em função dos efeitos aditivos de ruídos atmosféricos, o que acaba superestimando os valores de biomassa (HONGJUN et al., 2007).

O EVI foi desenvolvido por Huete et al. (2002) como produto do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). O EVI é uma variação do NDVI, sendo aprimorado em relação à redução de influências atmosféricas e do solo (HUETE et al., 2002). Seu valor vai de 0 a 1, onde os valores mais próximos de 1 indicam maior acúmulo de biomassa (HEUTE et al., 2002). Assim como o NDVI, o EVI reflete os parâmetros biofísicos da vegetação, porém o EVI é mais sensível as variações na estrutura do dossel da vegetação (HONGJUN et al., 2007).

O uso de índices de vegetação e bandas espectrais já vem sendo feito em diversos estudos, como o feito por (CASSOL; SALDANHA; KUPLICH, 2013) Cassol et al. (2013) e Ferraz (2014), onde foram geradas equações alométricas e modelos que permitiram estimar a biomassa florestal através de índices de vegetação e bandas espectrais. Porém, o desenvolvimento destes modelos só é possível quando já se tem conhecimento dos dados da biomassa vegetal da área, o que limita estes estudos a locais onde a cubagem rigorosa dos indivíduos é possível (SOMOGYI et al., 2007). Uma alternativa para esta limitação é compreender a relação entre variáveis de fácil obtenção que não exijam o abatimento de indivíduos e que estejam relacionadas a biomassa vegetal, como os índices de vegetação (MIGUEL et al., 2015).

3) OBJETIVOS

3.1) Objetivo Geral

Avaliar a relação entre a biomassa aérea lenhosa estimada com dados de campo e dados derivados de sensoriamento remoto utilizando imagens orbitais *RapidEye* e do satélite Landsat.

3.2) Objetivos Específicos

- Estimar a biomassa lenhosa acima do solo a partir de dados do inventário florestal conduzido na Floresta de Vale do Véu de Noiva (FVVN), localizada na Chapada dos Guimarães – MT;
- Estimar a refletância da vegetação arbustivo-arbórea na FVVN a partir de dados de imagens de satélite *RapidEye* e Landsat;
- Estimar índices de vegetação a partir de dados de imagens de satélite *RapidEye* e Landsat para a FVVN; e
- Avaliar a relação entre a biomassa lenhosa acima do solo mensurada em campo e índices de vegetação obtidos para a FVVN.

4) MATERIAL E MÉTODOS

4.1) Área de estudo

A Floresta do Vale do Véu de Noiva (FVVN) está localizada nas coordenadas 15°24'18,80" S e 55°49'55,35" W, situada no sudeste do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (PNCG) ocupando área de aproximadamente 30 hectares. A FVVN é classificada como floresta de vale em função da dificuldade em separar a floresta de encosta da floresta de galeria, localizada na parte baixa do relevo (EITEN, 1994).

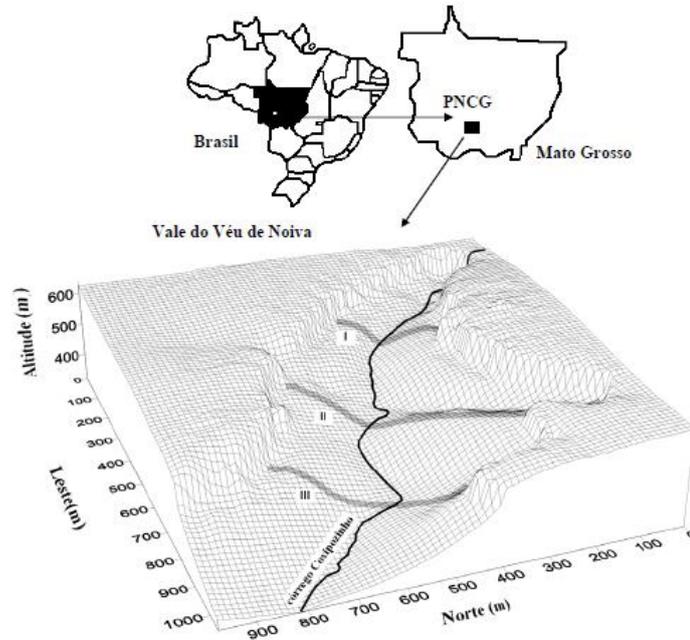


Figura 1. Localização do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (PNCG), Mato Grosso – Brasil e o perfil tridimensional do Vale do Véu de Noiva, indicando as três transeções de amostragem da vegetação (I, II e III). Fonte: Pinto (2002).

O clima na região do PNCG, classificado segundo o sistema de Köppen em Aw e Cw, é o tipo climático úmido nas épocas mais quentes e clima seco nas épocas mais frias (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual para a área varia de 1800 a 2000 mm, a estação seca compreende os meses de maio a setembro e o período chuvoso vai de outubro a março, concentrando cerca de 79,8% precipitação média anual (OLIVEIRA-FILHO; MARTINS, 1986; MONTEIRO, 1994). A altitude na região variam de 350 m na baixada cuiabana a 800 m no alto da Chapada e a cobertura vegetal é formada por diferentes fitofisionomias do Cerrado, que vão desde formações campestres até formações florestais, representadas pelas matas de galeria, florestas decíduas e semi decíduas (CAMARGO, 2011)

A FVVN se estende desde o talvegue, parte baixa do relevo, até o paredão rochoso. O solo de maneira geral é raso, classificado como Litólico em fase arenosa, com manchas de areia quartzosa distrófica, sendo que manchas de solos aluviais podem ocorrer no fundo do vale (PINTO; OLIVEIRA-FILHO, 1999).

O perfil florístico da FVVN apresenta forte semelhança com a flora Amazônica e Atlântica, evidenciando o caráter transicional da vegetação (PINTO; OLIVEIRA-FILHO, 1999). A estrutura da vegetação arbustivo-arbórea na FVVN se manteve estável no período de 1996 a 2010, com pequenas mudanças na composição florística restrita às

espécies de baixa abundância (ABREU; PINTO; MEWS, 2014; PINTO; HAY, 2005). Estes autores indicaram ganhos líquidos em área basal no período de 1999 a 2010, o que demonstra que este ambiente está em fase de acumulação de biomassa.

4.2) Inventário Florestal

O inventário florestal da vegetação arbustivo-arbórea foi realizado em dezembro de 2010 (ABREU; PINTO; MEWS, 2014), adotando o método de amostragem de área fixa (600 m²), com distribuição das unidades amostrais (parcelas) de forma sistemática (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997). A amostragem sistemática foi composta de três transeções em cada margem do córrego (próximo a queda dá água; na posição intermediária e na posição final do vale), conforme descrito por Pinto e Oliveira-Filho (1999). Cada transeção foi formada por seis parcelas de 600 m² instaladas em três setores topográficos: beira do córrego, meio e alto da encosta, totalizando 18 parcelas. Em cada parcela foram amostrados todos os indivíduos com circunferência à 1,30 m de altura (CAP) ≥ 15,7 cm, exceto lianas e indivíduos mortos (PINTO; OLIVEIRA-FILHO, 1999) e registrados os valores de CAP, altura total e identificação botânica. O CAP foi convertido para diâmetro (DAP):

$$DAP(cm) = \frac{CAP}{\pi}$$

DAP (cm) = diâmetro em cm;

CAP (cm) = circunferência medida à 1,30 m do solo;

π = constante Pi (3,1416).

O volume de cada indivíduo foi estimado através da seguinte equação, sendo utilizado fator de forma de 0,7, próximo ao definido por Colpini et al. (2009):

$$V(m^3) = \frac{DAP^2 * \pi}{40000} * 0,7$$

V = volume individual em m³.

Para estimar a biomassa lenhosa, o volume individual de cada indivíduo foi multiplicado pela densidade básica média de 650 kg/m³ encontrada por Fearnside (1997) para a vegetação lenhosa da floresta Amazônica e áreas de transição:

$$Bi(kg) = V * d$$

Bi = biomassa individual em kg;

V = volume individual em m³;

d = densidade básica média da madeira de 650 kg/m³.

Assim, para encontrar a biomassa total de cada parcela, foi somada a biomassa de cada indivíduo amostrado na parcela.

4.3) Índices de vegetação e reflectâncias espectrais

Para estimar os índices de vegetação referentes a cada parcela, foi utilizada uma cena de imagem do satélite *RapidEye* adquirida em 09 de agosto de 2011, e uma cena do satélite Landsat 5 TM (226/71) adquirida em 11 de julho de 2011. A cena do sistema de composição de imagens *RapidEye* foi disponibilizada pelo Ministério do Meio Ambiente e a cena do satélite Landsat 5 TM foi obtida gratuitamente do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>).

O sistema de composição de imagens multiespectrais *RapidEye* é constituído de cinco satélites operando conjuntamente, tendo resultado a geração de imagens de alta resolução espacial (FELIX; KAZMIERCZAK; ESPINDOLA, 2009). O *RapidEye* coleta imagens em cinco bandas espectrais: azul, verde, vermelho, *Red-Edge* e infravermelho próximo e possui resolução espacial de 5 metros, cobrindo área de 25 m² por pixel (FELIX; KAZMIERCZAK; ESPINDOLA, 2009). O satélite Landsat 5 TM adquire imagens em sete bandas espectrais: azul, verde, vermelho, duas no infravermelho próximo, infravermelho médio em resolução espacial de 30 metros, cobrindo 900 m² por pixel, e uma banda termal em resolução espacial de 120 metros (USGS, [s.d.]).

Ambas as cenas das imagens do satélite *RapidEye* e Landsat 5 TM foram corrigidas, geométrica, radiométrica e atmosféricamente, feito conforme sugerido por Meneses et al. (2012). A correção radiométrica foi feita para todas as bandas do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (SWIR) através da seguinte equação (MARKHAM; BARKER, 1986):

$$L_{\lambda} = L_{\min(\lambda)} + \left(\frac{L_{\max(\lambda)} - L_{\min(\lambda)}}{Q_{\max}} \right) Q_{\text{cal}}$$

- $L\lambda$ = radiância espectral na banda i ($\text{Watts m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$);
- $L_{max}(\lambda)$ = radiância espectral máxima na banda i;
- $L_{min}(\lambda)$ = radiância espectral mínima na banda i;
- Q_{max} = nível de cinza máximo na banda i;
- Q_{cal} = nível de cinza para o pixel.

A conversão dos valores de radiância para reflectância foi feita através da seguinte equação:

$$r_{0,i} = \frac{L_{rad} * \pi}{E_{0,i} * \cos \theta * d^2}$$

- $r_{0,i}$ = reflectância espectral na banda i;
- d^2 = inverso do quadrado da distância Terra-Sol em unidade astronômica;
- $E_{0,i}$ = valor médio da irradiância solar exo atmosférica na banda i em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ (constante solar);
- θ = ângulo zenital solar calculado a partir do ângulo de elevação solar;
- L_{rad} = radiância espectral na banda i em $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

As faixas espectrais de interesse foram: azul (0,44 a 0,51 μm), vermelho (0,63 a 0,685 μm) e infravermelho próximo (0,76 a 0,85 μm) (DUBE et al., 2014; LEAL et al., 2013). A partir destas bandas, foram estimados os índices de vegetação para cada parcela amostrada: EVI, NDVI e SR.

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foi estimado utilizando a equação (HUETE et al., 2002):

$$EVI = G \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_V}{\rho_{NIR} + C1 * \rho_V - C2 * \rho_A + L} \right)$$

- ρ_{NIR} = valores de reflectância para infravermelho próximo;
- ρ_V = valores de reflectância para o vermelho;
- ρ_A = valores de reflectância para o azul;
- G, L, C1 e C2 são fatores para corrigir as condições atmosféricas.

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi estimado utilizando a equação desenvolvida por Rouse et al. (1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v}$$

- ρ_{ivp} = valores de reflectância para infravermelho próximo;
- ρ_v = valores de reflectância para o vermelho.

O índice SR (*Simple Ratio*) foi estimado utilizando a equação desenvolvida por Birth e Mcvey (1968):

$$SR = \frac{\rho_{ivp}}{\rho_v}$$

- ρ_{ivp} = valores de reflectância para infravermelho próximo;
- ρ_v = valores de reflectância para o vermelho.

4.4) Ajuste do modelo

Como a área das parcelas (600 m²) do inventário florestal implantada em campo foi superior a resolução espacial dos pixels (25 m²) das imagens do satélite *RapidEye*, foi estimada a média dos pixels incluídos total ou parcialmente de cada índice de vegetação e de cada reflectância espectral para a parcela, conforme referido por Watzlawick et al. (2009). Para a imagem do satélite Landsat 5 TM, foram gerados *buffers* de 45 m a partir do centro de cada parcela a fim de obter a média dos pixels contidos no buffer, visto que a resolução espacial do pixel (900 m²) é superior ao tamanho das parcelas (600 m²), seguindo procedimento adotado por Miguel et al. (2015) e Ferraz et al. (2014). A partir dos valores médios dos índices de vegetação, foram estimadas as correlações de Pearson entre os índices e a biomassa total da parcela medida em campo. Sequencialmente, foram ajustados modelos com base no modelo linear, utilizando a biomassa total de cada parcela (Bi), a reflectância espectral no infravermelho próximo (NIR) e os índices de vegetação médios de cada parcela:

$$Bi = \beta_0 + \beta_1 * X + \varepsilon$$

Bi= biomassa total de cada parcela (kg/600 m²)

β_0 e β_1 = coeficientes a serem estimados;

X = índice de vegetação ou reflectância espectral;

ε = erro associado ao modelo.

Para cada índice de vegetação ou reflectância espectral, foram gerados o erro padrão da estimativa absoluto (Syx) e em percentagem (Syx %), coeficiente de determinação (R²) e gráfico de resíduos. A escolha do melhor índice de vegetação ou reflectância espectral para estimar a biomassa total da parcela foi baseada na variável que obteve a maior correlação, o menor erro padrão relativo (Syx%), maior coeficiente de correlação (R²) e melhor distribuição dos resíduos, calculados através da diferença entre a biomassa estimada e biomassa observada, conforme sugerido por Miguel et al. (2015). A partir do melhor modelo ajustado, foi gerada a superfície de biomassa para a FVVN conforme metodologia proposta por Propastin (2013) e o mesmo foi ajustado com a biomassa extrapolada em toneladas por hectare.

5) RESULTADOS

Com base nos dados de inventário florestal obtidos em campo, o total de biomassa lenhosa acima do solo para a vegetação arbustivo-arbórea da FVVN variou de 61,8 ton/ha a 455,79 ton/ha (Tabela 1). As parcelas com maior quantidade de biomassa foram I (455,79 toneladas), H (383,78 toneladas) e G (368,97 toneladas); e as com menor quantidade foram: S (61,98 toneladas), M (87,12 toneladas) e P (97,8 toneladas), estando a S e M localizadas no alto da encosta.

Tabela 1. Biomassa aérea lenhosa total estimada por parcela em kg para a vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães – MT, com base em dados do inventário de campo.

Transecto	Parcela	Biomassa (kg/600 m ²)	Biomassa (ton/ha)	Posição topográfica
I	A	11.415,78	190,263	Alto da encosta
I	B	20.503,25	341,720	Meio da encosta
I	C	8.490,92	141,515	Beira do córrego
I	D	15.919,11	265,318	Beira do córrego
I	E	10.848,18	180,803	Meio da encosta
I	F	14.256,78	237,613	Alto da encosta
II	G	22.138,46	368,974	Alto da encosta
II	H	23.026,86	383,781	Meio da encosta
II	I	27.347,72	455,795	Beira do córrego
II	J	6.361,65	106,027	Beira do córrego
II	L	9.085,19	151,419	Meio da encosta
II	M	5.227,20	87,120	Alto da encosta
III	N	6.187,44	103,124	Alto da encosta

Transecto	Parcela	Biomassa (kg/600 m ²)	Biomassa (ton/ha)	Posição topográfica
III	O	9.298,82	154,980	Meio da encosta
III	P	5.843,30	97,388	Beira do córrego
III	Q	16.577,74	276,295	Beira do córrego
III	R	7.377,65	122,960	Meio da encosta
III	S	3.718,80	61,980	Alto da encosta
	Média	12.423,60	207,060	
	DP	7027,20	117,12	
	CV (%)	56,56	56,56	

A correlação entre os índices (NDVI, EVI e SR) e a reflectância no infravermelho próximo (NIR) derivados das imagens dos satélites *RapidEye* e Landsat 5 TM foram altamente correlacionados, significativamente, com valores superiores a $R^2 > 0,89$ (Tabela 2). As cenas geradas para cada índice derivados de cada imagem dos satélites estão no Anexo I.

Todos os índices apresentaram correlação significativa (95% de probabilidade) entre si. As correlações entre a biomassa lenhosa e os índices obtidos do satélite Landsat 5 TM foram superiores em relação ao *RapidEye* (Tabela 2). Para as imagens do satélite Landsat 5 TM, os índices com maior correlação com a biomassa foram o SR (0,50) e o EVI (0,45). Já para o *RapidEye* foram o EVI (0,39) e a reflectância no infravermelho próximo (0,38).

Tabela 2. Correlação entre os índices de vegetação e a biomassa aérea lenhosa da vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT. Acima da diagonal encontram-se as correlações entre os índices derivados das imagens do satélite Landsat 5 TM e abaixo da diagonal entre os índices derivados das imagens do *RapidEye*. * Significativa a 95% de probabilidade.

		Landsat 5 TM				
		Biomassa	EVI	NDVI	NIR	SR
RapidEye	Biomassa	1	0,45	0,42	0,45	0,50*
	EVI	0,39	0,90*	0,95	0,98	0,98
	NDVI	0,33	0,98	0,89*	0,91	0,97
	NIR	0,38	0,96	0,94	0,92*	0,95
	SR	0,35	0,98	0,98	0,94	0,90*

Para o modelo ajustado, nenhum dos estimadores obtidos a partir dos índices derivados da imagem *RapidEye* foi significativo (95% de probabilidade) apresentando erro-padrão com valores superiores a $Syx\% > 53,18\%$ (Tabela 3).

Tabela 3. Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, estatística de ajuste e precisão: erro absoluto (Syx), erro relativo (Syx %) e coeficiente de determinação (R^2) para os índices derivados da imagem do satélite *RapidEye* * Significativos a 5% de significância.

	EVI	NDVI	NIR	SR	EVI*NDVI*NIR*SR
β_0	450,97	-3009,59	35,68	-2626,82	7595,49
β_1	20438,24	32266,35	42285,48	5157,40	17030,11
Syx	6661,45	6825,78	6693,52	6781,97	6607,05
Syx%	53,62	54,94	53,88	54,59	53,18
R^2	15,42	11,12	14,60	12,33	16,80

Para os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM, apenas os estimadores obtidos do SR e da interação entre os índices (NDVI*NIR*EVI*SR) foram significativos (95% de probabilidade), com elevado erro relativo (Syx%) de 50,31% e 50,87% e baixo coeficiente de determinação (R^2) de 0,25 e 0,23, respectivamente (Tabela 4). Com base no valor dos resíduos (Figura 3), no Syx% e no R^2 o modelo com SR foi o mais adequado para estimar a biomassa a partir dos dados de satélite. O coeficiente de determinação (R^2) do ajuste de todos os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM foram superiores aos derivados da imagem do satélite *RapidEye*.

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, estatística de ajuste e precisão: erro absoluto (Syx), erro relativo (Syx %) e coeficiente de determinação (R^2) para os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM *Significativos a 5% de significância.

	EVI	NDVI	NIR	SR	EVI*NDVI*NIR*SR
β_0	6770,018	4332,92242	6549,199	3656,20	8817,62
β_1	14570,33	15198,56099	33815,09	2193,58*	11965,63*
Syx	6459,70	6552,7292	6466,00	6250,45	6319,63
Syx %	52,00	52,74	52,05	50,31	50,87
R^2	20,47	18,16	20,31	25,53	23,88

Para os índices derivados da imagem do satélite *RapidEye* o ajuste feito a partir da interação entre os índices foi o que apresentou a melhor distribuição dos resíduos

(Figura 2), no entanto, a utilização do modelo não é viável visto que esta variável não foi significativa. O ajuste feito através do NDVI derivado da imagem satélite Landsat 5 TM apresentou distribuição de resíduos superior a referente à interação entre os índices e ao SR (Figura 3). No entanto, como os estimadores obtidos do NDVI não foram significativos, o índice não foi considerado adequado para estimar biomassa para a área deste estudo.

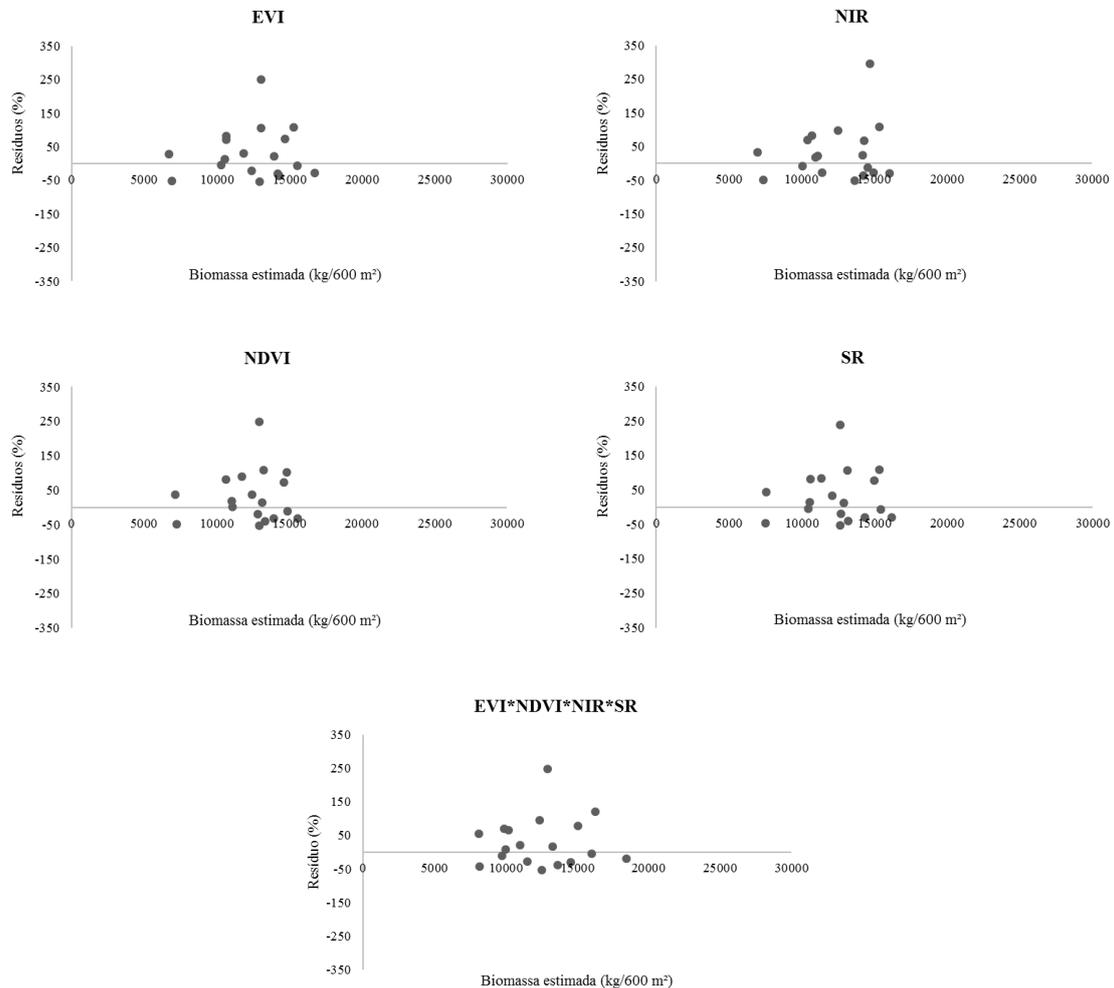


Figura 2. Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa aérea lenhosa a partir dos índices derivados da imagem do satélite *Rapideye* para a vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT. (Res = Biomassa estimada – Biomassa observada)

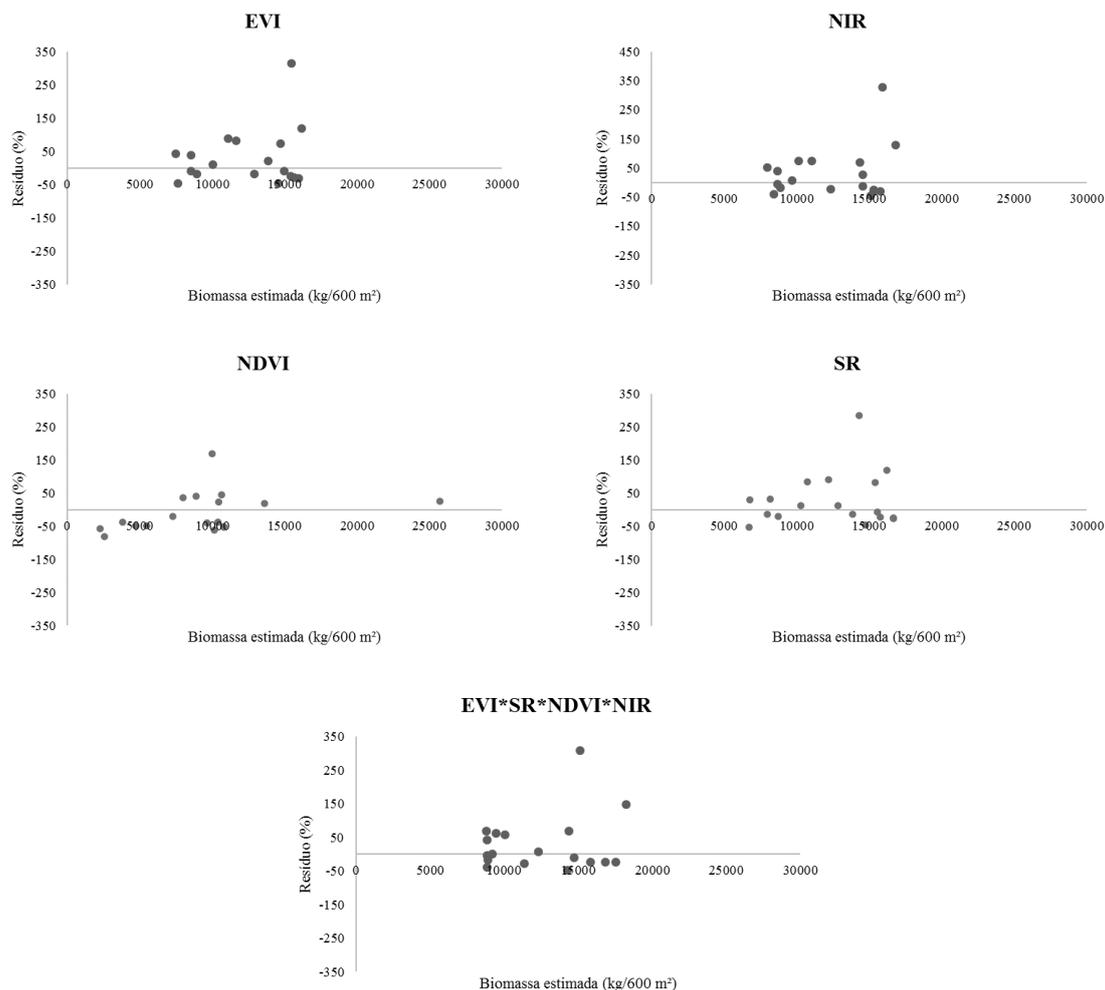


Figura 3. Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa aérea lenhosa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM para a vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT. (Res = Biomassa estimada – Biomassa observada)

O melhor modelo para estimar a biomassa aérea da vegetação arbustivo-arbórea foi o obtido com o uso do *Simple Ratio* e a partir dele foi gerada a superfície de biomassa para a FVVN (Figura 4).

$$I - B \text{ (kg/600 m}^2\text{)} = 3656,200873 + 2193,584532 * SR$$

$$II - B \text{ (ton/ha)} = 60,93668121 + 36,55974219 * SR$$

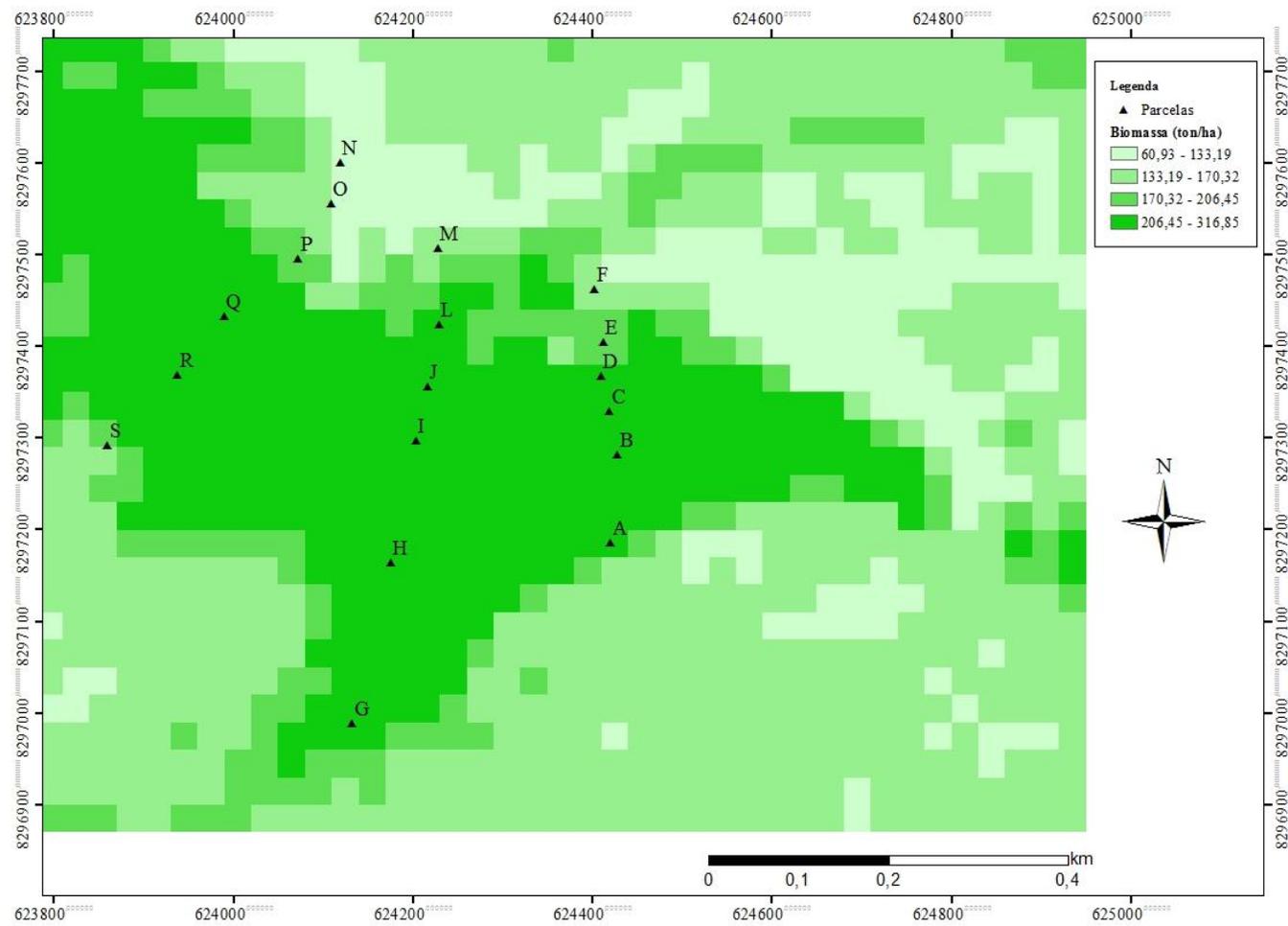


Figura 4. Distribuição da biomassa aérea lenhosa da vegetação arbustivo-arbórea da Floresta de Vale do Véu de Noiva, Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT, obtida a partir da aplicação do modelo ajustado a partir do índice Razão Simples (*Simple Ratio*) derivado da imagem do satélite Landsat 5 TM.

6) DISCUSSÃO

A forte correlação entre os índices de vegetação obtidos a partir das imagens dos dois satélites pode ser explicada pela alta correlação do comportamento espectral dos alvos. Tanto a imagem do satélite Landsat 5 TM quanto a imagem do satélite *RapidEye* registram a reflectância da FVVN em faixas espectrais específicas que, apesar de possuírem resolução espacial diferente, representam o mesmo alvo em áreas variáveis na superfície (JENSEN, 2009). É esperado, portanto, que os valores dos índices sejam muito similares para os índices derivados das imagens de ambos os satélites.

A maior correlação entre a biomassa lenhosa e os índices de vegetação quando utilizada a imagem do Landsat 5 TM pode ser explicada pela maior resolução espacial. Os índices derivados da imagem do satélite *RapidEye* para as parcelas localizadas no alto da encosta foram afetados pela interferência da sombra do paredão rochoso que recobre a FVVN e os índices de vegetação para as parcelas localizadas no meio da encosta e na beira do córrego foram influenciados pelas sombras resultantes da arquitetura de dossel da floresta, conforme observado por Sothe et al. (2017) e Matos e Kirchner (2007). Chen et al. (2004) encontraram uma maior correlação entre dados derivados de imagem do satélite IKONOS e dados da vegetação degradados para 30 m do que na resolução de 4 m. Assim, a utilização de dados de satélites com menor resolução espacial como o Landsat 5 TM resulta em pixels mais homogêneos, com menor interferência de sombra.

O SR derivado da imagem do satélite Landsat 5 TM foi o índice que melhor estimou a biomassa na área de estudo. Este resultado é provavelmente devido a alta amplitude da biomassa entre as parcelas. O SR é um índice sensível a variações em biomassa para vegetações com grande acumulação de biomassa, como os ambientes florestais, visto que ele representa a razão da banda do infravermelho próximo (NIR), que é de alta reflectância, e a do vermelho, que é de baixa reflectância, não sendo normalizado como os demais índices (JENSEN, 2009). Assim, ele foi capaz de acompanhar as variações na biomassa entre as parcelas, sendo o melhor estimador neste estudo. Bolfe et al. (2012) encontraram resultado semelhante analisando a correlação entre índices de vegetação e a biomassa de sistemas agroflorestais, assim como Watzlawick et al. (2009) correlacionando o SR a biomassa da vegetação de uma floresta de Araucária.

O SR e a interação entre os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM foram as únicas variáveis significativas para estimar a biomassa, apesar de

apresentar baixa qualidade no ajuste ($R^2=25,53$). Miguel et al. (2015) encontraram tendência de superestimação e subestimação em torno de 55% na estimativa de biomassa para vegetação de cerrado em uma área de transição entre Cerrado e floresta Amazônica porém com erro padrão de 16,80 % e R^2 de 0,92 . Isto pode ser atribuído ao ajuste feito pelos autores de modelos de regressão múltiplos utilizando índices de vegetação e área basal, tendo a área basal contribuído para melhorar o ajuste, o que não foi feito no presente estudo. Watzlawick et al. (2009), em ajustes de regressões simples e múltiplas, utilizando apenas índices de vegetação e reflectância espectral de imagem do satélite IKONOS II para a estimativa de biomassa e estoque de carbono, encontraram erro-padrão variando entre 22,59% a 61,55% e R^2 entre 0,2 e 73, dependendo do modelo, para floresta de Araucária, no sul do Brasil. O melhor modelo encontrado por estes autores foi ajustado a partir do NIR e de dois índices de vegetação: NDVI e SAVI. O resultado encontrado por estes autores foi diferente deste estudo provavelmente devido aos índices que são altamente correlacionados ($R>0,8$), e portanto, não foram ajustados modelos múltiplos evitando a multicolinearidade entre os estimadores. Muukkonen e Heiskanen (2005) ajustaram modelos de regressão não-lineares utilizando o NIR para estimar a biomassa de uma floresta boreal, na Finlândia. O melhor modelo ajustado apresentou R^2 de 0,56 e erro-padrão relativo de 43%. Apesar deste modelo ter sido superior ao do presente trabalho, foi o que apresentou valores mais próximos aos dos encontrados. A utilização de variáveis de campo nos ajustes aumentam sua qualidade, entretanto, eles perdem sua capacidade de generalização para áreas onde não há a informação da área basal (BARBOSA; BROADBENT; BITENCOURT, 2014).

Todas as variáveis independentes nos modelos propostos foram obtidas através de dados derivados de imagens de satélite. Desta forma a equação gerada pode ser generalizada para o restante da área avaliada e outras florestas semelhantes. Assim, utilizando apenas o SR, foi possível obter coeficiente de determinação de 0,25 para estimar a biomassa, ou seja, este índice explica sozinho apenas 25% da biomassa florestal, demonstrando a necessidade da utilização de dados de campo para estimativas mais precisas.

Os baixos valores de ajuste da regressão encontrados podem ter ocorrido em função das influências topográficas na reflectância espectral dos alvos nas parcelas localizadas no alto da encosta em função da presença de sombra nas mesmas. Barbosa et al. (2014) ressaltam a importância de se considerar as condições topográficas na modelagem da biomassa florestal para áreas íngremes. Além disto, a baixa intensidade

amostral pode afetar a qualidade do ajuste (BARBOSA; BROADBENT; BITENCOURT, 2014).

O SR derivado da imagem do satélite Landsat 5 TM apresentou correlação positiva e significativa com o estoque de biomassa. Entretanto, essa correlação ($r=0,5$) explica pouco a variação da biomassa ($R^2=25,53\%$). Foody et al. (2003) e Cohen et al. (2001) abordam acerca da limitação existente na utilização de dados de sensoriamento remoto para a generalização de atributos da vegetação para outras áreas em função da diferença das condições ambientais de cada local e da dependência de variáveis de campo. Os dados de campo enquanto estimadores dentro dos modelos podem aumentar a qualidade do ajuste, entretanto, eles não permitem a extrapolação dos modelos que é viabilizada pelos índices de vegetação para áreas maiores e de difícil acesso.

7) CONCLUSÃO

Dos índices de vegetação avaliados, apenas o Razão Simples (*Simple Ratio* – SR) apresentou correlação significativa com a biomassa. Entretanto, este índice explicou pouco a variação da biomassa. Os índices de vegetação derivados a partir de dados do satélite Landsat 5 TM e do *RapidEye* são significativamente correlacionados. Apesar disso, para regiões onde há grande quantidade de sombras em função das características topográficas, os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM são mais correlacionados a biomassa aérea lenhosa devido ao maior efeito de mistura espectral de cada pixel.

8) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, T. A. L.; PINTO, J. R. R.; MEWS, H. A. Variações na riqueza e na diversidade de espécies arbustivas e arbóreas no período de 14 anos em uma Floresta de Vale, Mato Grosso, Brasil. Resumo O presente trabalho teve como objetivo descrever variações na riqueza, na diversidade e na contribuição do. **Rodriguésia**, v. 65, n. 1, p. 73–88, 2014.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, L. F. et al. Forest structure and live aboveground biomass variation along an

- elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 5, p. 679–691, 2010.
- ASHRAF, M. A.; MOHD, JAMIL, M.; YUSOFF, I. **Introduction to Remote Sensing of Biomass**. [s.l: s.n.].
- BARBOSA, J. M. et al. Remotely sensed biomass over steep slopes: An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 91–100, 2014.
- BARBOSA, J. M.; BROADBENT, E. N.; BITENCOURT, M. D. Remote Sensing of Aboveground Biomass in Tropical Secondary Forests: A Review. **International Journal of Forestry Research**, n. ID 715796, p. 1–14, 2014.
- BIRTH, G. S.; MCVEY, G. R. Measuring Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v. 60, p. 640–649, 1968.
- BOLFE, É. L.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, M. C. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1261–1269, 2012.
- BRIENEN, R. J. W. et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, v. 519, n. 7543, p. 344–348, 2015.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. **Science**, v. 223, n. 4642, p. 1290–1293, 1984.
- BROWN, S.; LUGO, A. E.; CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. **Can.J.For.Res.**, v. 16, n. FEBRUARY 2011, p. 390–393, 1986.
- CAMARGO, L. (ED.). **Atlas de Mato-Grosso: Abordagem socioeconômica-ecológica**. Cuiabá - MT: [s.n.].
- CASSOL, H. L. G.; SALDANHA, D. L.; KUPLICH, T. M. Comparação dos sensores ASTER e TM para a estimativa de biomassa e carbono em uma Floresta Ombrófila Mista. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 2003, p. 3090–3097, 2013.
- CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005.

- CHEN, X. et al. Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM + vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest. v. 91, p. 14–26, 2004.
- COHEN, W. B. et al. Modelling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 12, p. 2279–2310, 2001.
- COLPINI, C. et al. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 1, p. 97–104, 2009.
- DUBE, T. et al. Intra-and-inter species biomass prediction in a plantation forest: Testing the utility of high spatial resolution spaceborne multispectral rapideye sensor and advanced machine learning algorithms. **Sensors (Switzerland)**, v. 14, n. 8, p. 15348–15370, 2014.
- EITEN, G. Vegetação do cerrado. In: **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. UnB ed. Brasília: [s.n.]. p. 17–73.
- FAO. **Roles of forests in climate change**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/climatechange/53459/en/>>.
- FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 90, p. 59–87, 1997.
- FELIX, I. M.; KAZMIERCZAK, M. L.; ESPINDOLA, G. M. DE. RapidEye: a nova geração de satélites de Observação da Terra. **Anais XIV. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE**, p. 7619–7622, 2009.
- FERRAZ, A. S. et al. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 286–296, 2014.
- FOODY, G. M.; BOYD, D. S.; CUTLER, M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, n. 4, p. 463–474, 2003.
- GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11–20, 1965.
- HEUTE, A. et al. Overview of the radiometric performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 195–213, 2002.

- HIGA, R. C. V. et al. **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal**. [s.l: s.n.]. v. 1
- HIGUCHI, N. et al. Aboveground biomass estimate for Amazonian dense tropical moist forests. **Mem. Fac. Agr. Kagoshima Univ.**, v. 30, n. t 987, p. 43–54, 1994.
- HIGUCHI, N.; SANTOS, J. DOS; RIBEIRO, R. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 153–165, 1998.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change**. Summary for policymakers. **Anais...2007**
- IPCC. **Carbon dioxide capture**. [s.l: s.n.].
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. [s.l: s.n.].
- KUMAR, L. et al. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 97696, 2015.
- LACERDA, J. S. DE et al. Estimativa da biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas. **Publicações da ESALQ**, p. 23, 2009.
- LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 7, p. 1297–1328, 2006.
- MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature. **EOSAT Landsat Tech. Notes**, v. 1, p. 3–8, 1986.
- MATOS, F. D. DE A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa De Biomassa Da Floresta Ombrófila Densa De Terra Firme Na Amazônia Central Com O Satélite Ikonos Ii. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 157–171, 2007.
- MENESES, P. R. et al. **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Espectrais**. [s.l.] Editora Universidade de Brasília e Embrapa Cerrados, 2001.
- MENEZES, P. R. et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. [s.l.] UnB, 2012.
- MIGUEL, E. P. et al. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira

- e biomassa do cerrado com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 829–839, 2015.
- MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 4, p. 434–447, 2005.
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. [s.l: s.n.].
- PAN, Y. et al. The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, n. 1, p. 593–622, 2013.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: [s.n.].
- PINTO, J. R. R.; HAY, J. D. V. Mudanças florísticas e estruturais na comunidade arbórea de uma floresta de vale no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 28, n. 3, p. 523–539, 2005.
- PINTO, J. R. R.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. DE. Perfil florístico e estrutura da comunidade arbórea de uma floresta de vale no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 22, n. 1, p. 53–67, 1999.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.
- PROPASTIN, P. GIScience & Remote Sensing Large-scale mapping of aboveground biomass of tropical rainforest in Sulawesi, Indonesia, using Landsat ETM+ and MODIS data. **GIScience & Remote Sensing**, v. 50, n. May 2014, p. 633–651, 2013.
- ROUSE, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. Greenbelt, MD: [s.n.].
- ROY, P. S.; RAVAN, S. A. Biomass estimation using satellite remote sensing data—An investigation on possible approaches for natural forest. **J. Biosci**, v. 21, n. 4, p. 535–561, 1996.
- SANQUETTA, C. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 119–140.
- SANQUETTA, C. R. et al. Estimativa de carbono individual para araucaria angustifolia. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 44, n. 1, p. 1–8, 2014.

- SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P.; DA SILVA, F. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for Pinus in Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 6, n. 1, p. 6, 2011.
- SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BENEDET MAAS, G. C. T. The role of forests in climate change. **Quebracho - Revista de Ciencias Forestales**, v. 19, n. 1.2, p. 84–96, 2011.
- SARMIENTO, G.; PINILLOS, M.; GARAY, I. Biomass Variability in Tropical American Lowland Rainforests. **Ecotropicos**, v. 18, n. 1, p. 1–20, 2005.
- SOARES, P.; TOMÉ, M. Analysis of the effectiveness of biomass expansion factors to estimate stand biomass. **Proceedings of the International Conference on Moedling Forest Production, 19-22 April. Austria.**, n. January, p. 19–22, 2004.
- SOLOMON, S. et al. **Climate change 2007: the physical science basis**. [s.l: s.n.].
- SOMOGYI, Z. et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n. 2, p. 197–207, 2007.
- SOTHE, C. et al. **Approaches for classifying successional forest stages in São Joaquim National Park using Landsat-8 and RapidEye images**.
- USGS. **Landsat 5 History**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-5-history>>.
- WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucaria utilizando imagens do satélite ikonos II. **Ciencia Florestal**, v. 19, n. 2, p. 169–181, 2009.

ANEXO

Cenas referentes a cada índice, sendo a primeira referente ao *RapidEye* e a segunda ao Landsat 5 TM.

