

Utilização de índices de vegetação obtidos com sensores proximais para a estimativa da biomassa e do valor nutritivo de pastagens tropicais

Use of vegetation indexes obtained with proximal sensors to estimate the biomass and nutritional value of tropical pastures

Henrique Bauab Brunetti¹, Cristiam Bosi², José Ricardo Macedo Pezzopane³, Alberto Carlos de Campos Bernardi⁴, Patrícia Menezes Santos⁵

¹ Pós doutorando, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, henrique_b_brunetti@hotmail.com

² Eng. Agrônomo, UFPR, Embrapa Pecuária Sudeste, Paranavai (PR), Brasil, cristiambosi@yahoo.com.br

³ Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br

⁴ Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br

⁵ Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, patricia.santos@embrapa.br

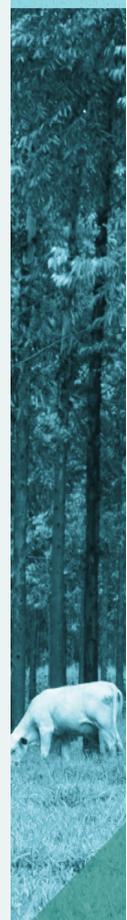
RESUMO

A quantificação da massa de forragem e do valor nutritivo das pastagens é essencial para a adoção de estratégias de manejo adequadas. A quantificação dessas variáveis por método destrutivo (direto) é laboriosa e susceptível a erro devido à grande variabilidade espacial, comum em pastagens. Alternativamente, essas variáveis podem ser estimadas indiretamente por sensores proximais utilizando-se índices de vegetação, destacando-se aqueles que consideram as reflectâncias da radiação pelo dossel nos comprimentos de onda do vermelho (670 nm) e infravermelho próximo (NIR) (760 nm), como o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Razão Simples (SRI) e o Índice de Razão Simples Modificado (MSR); e, na banda do 720 nm, utilizam-se o Índice de Diferença Normalizada do Vermelho Distante (NDVIRE) e o Índice de Clorofila (ChL). Para pastagens tropicais altamente produtivas, o NDVI tem mostrado saturação quando a biomassa de forragem é muito alta, enquanto o SRI, por não saturar sob essas condições, apresenta resultados melhores. Em estudos com forrageiras em parcelas, sob corte mecânico, a utilização do SRI para a estimativa de biomassa total de *Urochloa brizantha* cv. Marandu resultou em coeficiente de determinação relativamente alto, embora menor quando comparado às estimativas de massa de folha e folhas + colmo. As melhores estimativas das variáveis que consideram apenas folhas e colmos se devem à baixa correlação entre índices de vegetação e material senescente. Para a estimativa de biomassa total de *U. brizantha* cv. BRS Piatã sob pastejo, estudos concluíram que o uso de equações diferentes para estimativa de biomassa para sistemas a pleno sol e sombreados é mais apropriado. Neste caso, o SRI e o MSR foram os melhores índices para estimativa de biomassa total do pasto a pleno sol e sombreado. Boas estimativas considerando ambos os sistemas concomitantemente foram obtidas para biomassa de folha + colmo, biomassa de folha e Índice de Área Foliar (IAF). A extração de nitrogênio pelo pasto foi bem estimada pelo SRI, demonstrando potencial para uso no auxílio da adubação nitrogenada. Portanto, os índices de vegetação utilizados nestes trabalhos têm potencial para estimativa de produtividade e extração de nitrogênio de cultivares de braquiária em sistemas de produção diversos. Com o acoplamento de sensores a sistemas de posicionamento global (GPS), mapas podem ser criados e, por meio de monitoramento em tempo real, os sensores podem auxiliar produtores na tomada de decisão.

Palavras-chave: capins tropicais; método não destrutivo de estimativa de massa de forragem; estimativa de extração de nitrogênio.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000046>

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.



ABSTRACT

Forage mass and nutritive value quantification is essential for implementing adequate management strategies. Quantification using the destructive (direct) method is labor intensive and susceptible to errors due to the significant spatial variability common to pasturelands. Conversely, these variables can be indirectly estimated by proximal sensors using vegetation indexes, with those that consider canopy radiation reflectance at red (670 nm) and proximal infra-red (NIR) (760 nm) wavelengths standing out. These include the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Simple Ratio Index (SRI), and Modified Simple Ratio Index (MSR) and at the 720 nm band the Normalized Difference Red Edge (NDVIRE) and Chlorophyll Index (ChL). For highly productive tropical pastures, the NDVI becomes saturated when biomass is very high, while the use of SRI, due to the lack of saturation in such conditions, results in better estimations. In plot studies with mechanically clipped forage grasses, the use of SRI for the *Urochloa brizantha* cv. 'Marandu' total biomass estimation resulted in relatively high coefficient of determination, although lower when compared to estimations for leaf and leaf + stem biomass. The better estimations of variables that consider only leaf and stem is due the low correlation between vegetation indexes and senescent material. For the estimation of *U. brizantha* 'BRS Piatã' total biomass under grazing conditions, studies concluded that different equations for biomass estimation in full sun and shaded pastures were needed. In such cases, the SRI and MSR were the best indexes for the total biomass estimation of full sun and shaded pastures. Good estimates considering both systems together were achieved for leaf + stem biomass, leaf biomass, and leaf area index (LAI). Pasture nitrogen extraction was effectively estimated using the SRI, showing the potential of this tool for assisting with nitrogen fertilization. Therefore, the vegetation indexes used in these studies have the potential to estimate the productivity and nitrogen extraction of *Brachiaria* cultivars in diverse livestock systems. By coupling the sensor with global positioning systems (GPS), maps can be drawn, and, through real time monitoring, the sensors can be used for aiding farmers in decision making.

Keywords: tropical pastures; non-destructive method for forage mass estimation; nitrogen extraction estimation.

1 INTRODUÇÃO

A quantificação da massa de forragem e de seus componentes é essencial para a determinação da capacidade de suporte, da frequência e da severidade de desfolhação de pastagens (Parsons; Penning, 1988). A mensuração da massa de forragem por método destrutivo (direto) é laboriosa e susceptível a erro devido à sua grande variabilidade espacial na área. Tal variabilidade é resultado do comportamento ingestivo dos animais, da distribuição desigual das excretas, da topografia, da variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo, entre outros fatores (Pullanagari et al., 2013), e dificulta o uso eficiente da mensuração direta de massa de forragem em grandes áreas. Nesse contexto, os métodos indiretos surgem como alternativa menos laboriosa para a estimativa de massa de forragem, além de possibilitarem a verificação da variabilidade espacial da mesma. Os métodos indiretos não são destrutivos e geralmente permitem maior número de amostragens, mas necessitam de calibração específica para espécie, características do pasto e sistema de produção. Dentre os métodos indiretos, destacam-se aqueles que consideram a reflectância de radiação dos dosséis vegetais, chamados de índices de vegetação, que podem ser obtidos por sensoriamento remoto com uso de sensores distais (satélites) (Schellberg et al., 2008; Cisneros et al., 2020) ou com o uso de sensores proximais, os quais

podem ser fixos, manuais ou acoplados a tratores, maquinários ou drones (Pallottino et al., 2019).

Devido ao potencial desses métodos para auxílio na tomada de decisão em sistemas de produção animal a pasto, estes têm sido alvo de estudos por diversos grupos de pesquisa pelo mundo (Trotter et al., 2010), principalmente em pastagens temperadas (Flynn et al., 2008; Trotter et al., 2010; Barnes et al., 2015), além de alguns estudos pioneiros em pastagens tropicais (Starks et al., 2006a; Starks et al., 2006b; Zhao et al., 2007; Starks et al., 2008; Pezzopane et al., 2019; Pezzopane et al., 2022). Além de estimativas de quantidade de forragem, os sensores proximais podem ser empregados para estimativa da extração de nitrogênio (Pezzopane et al., 2022) e do valor nutritivo das gramíneas (Pullanagari et al., 2013). Nesse contexto, o acoplamento dos sensores de reflectância com sistemas de posicionamento global (GPS) pode ser utilizado para geração de mapas e monitoramento em tempo real da quantidade e da qualidade de forragem para auxílio na tomada de decisão em sistemas pecuários baseados em pastagens.

Dentre os índices de vegetação mais utilizados, se destaca o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI; Tabela 1), que considera a reflectância dos tecidos vegetais nos comprimentos de onda do vermelho (670 nm) e infravermelho próximo (NIR) (760 nm), e é utilizado para estimar produtividade (Teal et al., 2006; Amaral et al., 2015), Índice de Área Foliar (IAF;

Tabela 1. Principais índices de vegetação utilizados em estimativas de características produtivas de pastagens tropicais.

Índice	Fórmula	Referência
Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI)	$\frac{NIR_{760} - Red_{670}}{NIR_{760} + Red_{670}}$	Rouse Junior (1974)
Índice de Diferença Normalizada do Vermelho Distante (NDVI_RE)	$\frac{NIR_{760} - RE_{720}}{NIR_{760} + RE_{720}}$	Rodriguez et al. (2006)
Índice de Razão Simples (SRI)	$\frac{NIR_{760}}{Red_{670}}$	Tucker (1979)
Índice de Clorofila (ChL)	$\frac{NIR_{760}}{Red_{720}} - 1$	Gitelson et al. (2005)
Índice de Razão Simples Modificado (MSR)	$\frac{(NIR_{760} - Red_{670}) - 1}{(NIR_{760} + Red_{670})^{0,5} + 1}$	Chen (1996)

Tabela 2. Relação entre biomassa total de forragem, biomassa de folha + colmo, biomassa de folha e Índice de Área Foliar de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e Índice de Razão Simples (SRI).

Variável*	Equação	R ²
Biomassa de forragem	$y = 364,55x + 2399,9$	0,73
Biomassa de folha + colmo	$y = 328,22x - 302,2$	0,79
Biomassa de folha	$y = 231,1x - 550,21$	0,75
Índice de área foliar	$y = 0,4465x - 0,9084$	0,70

*Dados oriundos de capim Marandu cultivado sob diferentes regimes de irrigação (irrigado ou sequeiro) e adubação nitrogenada (0 ou 50 kg N/ha). Adaptado de Pezzopane et al. (2022).

Cao et al., 2013) e concentração de nutrientes em plantas (Gitelson et al., 2005; Zhao et al., 2007).

Apesar de alguns bons resultados obtidos com o uso do NDVI (Teal et al., 2006; Amaral et al., 2015), a correlação entre NDVI e biomassa pode ser ruim quando há quantidade significativa de tecidos senescidos (Todd et al., 1998; Flynn et al., 2008). Além disso, a correlação entre NDVI e biomassa tem natureza assintótica e, em altas quantidades de biomassa, o NDVI satura (Gitelson et al., 2002; Mutanga; Skidmore, 2004). Nesse contexto, outros índices de vegetação baseados na reflectância dos mesmos comprimentos de onda do NDVI têm sido usados, como o Índice de Razão Simples (SRI; Tabela 1) e o Índice de Razão Simples Modificado (MSR). Adicionalmente, o índice de Diferença Normalizada do Vermelho Distante (NDVIRE) e o Índice de Clorofila (ChL) são utilizados considerando a reflectância na banda de 720 nm.

Entretanto, o uso de índices de vegetação para forrageiras tropicais ainda é reduzido.

2 USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVAS DE CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS EM PASTAGENS TROPICAIS

2.1 Pastagens tropicais manejadas sob corte mecânico

Em estudo com *Urochloa brizantha* cv. Marandu, Pezzopane et al. (2022), manejando o capim sob corte mecânico em diferentes condições hídricas (irrigado e sequeiro) e de adubação nitrogenada (aplicação de 0 ou 50 kg N ha⁻¹ após cada corte), obtiveram resultados satisfatórios de estimativa de biomassa de forragem, biomassa de folha + colmo, IAF e biomassa de folhas, utilizando-se de índices de vegetação obtidos por sensor proximal, principalmente o SRI (Tabela 2). Quando a quantidade de biomassa é alta, o NDVI é pouco sensível a aumentos na biomassa devido à saturação desse índice, o que ocorre com menor magnitude para o índice SRI. Nesse contexto, quando há alta produção de biomassa, como no caso do capim Marandu nesse estudo (até 8000 kg MS/ha), o SRI tem melhor potencial para ser utilizado como método indireto de estimativa de produção. A saturação do NDVI se deve à maior absorção e, portanto, menor reflectância da banda do vermelho (670 nm) com o aumento da biomassa. Por outro lado, para o SRI, isso não ocorre, pois a reflectância do 760 nm é diretamente proporcional a aumentos na biomassa (Pezzopane et al., 2022). Vale ressaltar, no entanto, o potencial do uso do NDVI para pastagens menos produtivas (Paruelo et al., 1997; Li; Guo, 2010).

Os bons resultados obtidos por Pezzopane et al. (2022) refletem o uso de diferentes condições de manejo que permitem alta amplitude de produção vegetal e boa calibração das equações. Embora a performance do SRI em estimar a biomassa total de forragem tenha sido relativamente alta (R² = 0,73), ela foi menor quando comparada às estimativas de massa de folhas (R² = 0,75) e folhas + colmo (R² = 0,79). Esse fato ocorre devido à menor reflectância do material senescido quando comparado ao material vivo verde e foi constatado em diversos estudos com forrageiras tropicais e temperadas (Todd et al., 1998; Flynn et al., 2008; Pezzopane et al., 2019).

2.2 Sistemas de produção com pastagens tropicais sob pastejo

Em fazendas comerciais, o pasto é, em grande parte, pastejado por animais em vez de ser cortado mecanicamente. Em pastos manejados sob pastejo, ocorre

maior variabilidade espacial das suas variáveis produtivas, decorrente da seletividade animal durante o pastejo, da rejeição de certos locais por deposição de fezes e urina, da topografia, entre outros fatores (Pullanagari et al., 2013). Além disso, no Brasil e em alguns outros países, o uso de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) tem aumentado, demandando estudos que contemplem o uso de índices de vegetação para esses sistemas.

Pezzopane et al. (2019) utilizaram os índices de vegetação para estimativa de variáveis de produção vegetal em sistemas de produção animal baseados em pastagens em sequeiro. Os sistemas eram compostos

de pastos de capim Piatã (*Urochloa* (syn. *Brachiaria*) *brizantha* cv. BRS Piatã) a pleno sol e pastagens de capim Piatã sombreadas por árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) (Figura 1). Os autores concluíram que, para a estimativa de biomassa total, o uso de equações diferentes para sistemas a pleno sol e sombreados é mais apropriado. Nesse caso, o SRI e o MSR foram os melhores índices para estimativa de biomassa total do pasto a pleno sol ($R^2 = 0,53$) e sombreado ($R^2 = 0,48$), respectivamente, com melhores desempenhos quando comparados às estimativas que consideraram a biomassa total de ambos os sistemas juntos (Tabela 3; NDVI, $R^2 = 0,30$). Provavelmente, esse fa-



Figura 1. Medição de índices de vegetação em pasto de capim Piatã sombreado por árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) (A) e a pleno sol (B) em São Carlos, SP. Detalhes do aparelho ACS-430 Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, USA) utilizado para medição dos índices de vegetação (C e D).

Tabela 3. Relação entre biomassa total de forragem, biomassa de folha + colmo, biomassa de folha e Índice de Área Foliar de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã cultivada a pleno sol e sombreada e índices de vegetação.

Variável	Pasto a pleno sol (SRI)		Pasto sombreado (MSR)		Todos os sistemas (NDVI)	
	Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
Biomassa total de forragem	$y = 300,18x + 5947,4$	0,53	$y = 448,37x + 1011,9$	0,48	$y = 1097,7e^{1,6654x}$	0,30
Biomassa de folha + colmo	$y = 397,06x + 756,32$	0,64	$y = 594,17x - 562,23$	0,83	$y = 169,43e^{3,4617x}$	0,75
Biomassa de folha	$y = 195,73x + 301,72$	0,84	$y = 384,47x - 441,82$	0,83	$y = 77,668e^{3,7461x}$	0,80
Índice de área foliar	$y = 0,3268x + 0,5481$	0,74	$y = 1,1442x - 1,5504$	0,83	$y = 0,1321e^{4,2178x}$	0,81

SRI: Índice de Razão Simples; MSR: Índice de Razão Modificado; NDVI: Índice de Vegetação de Diferença Normalizada; Adaptado de Pezzopane et al. (2019).

Tabela 4. Relação entre teor de proteína bruta e o total de nitrogênio extraído pelo pasto de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e índices de vegetação.

Variável*	Índice de vegetação	Equação	R ²
Porcentagem de proteína bruta	Índice de Clorofila (ChL)	$y = 5,7934x + 5,5366$	0,32
Total de nitrogênio presente na vegetação	Índice de Razão Simples (SRI)	$y = 7,0837x - 16,843$	0,77

*Dados oriundos de capim Marandu cultivado sob diferentes regimes de irrigação (irrigado ou sequeiro) e adubação nitrogenada (0 ou 50 kg N/ha).

Adaptado de Pezzopane et al. (2022).

to decorre de alterações estruturais que ocorrem em pastos sombreados, como menor densidade populacional de perfilhos e perfilhos mais delgados e altos (Crestani, 2015). Adicionalmente, mudanças no aparato fotossintético da folha que ocorrem como adaptação a ambientes sombreados, como menor razão clorofila a/b e menor quantidade de clorofila por unidade de área foliar (Lichtenthaler et al., 1981), causam modificações ópticas nas folhas e, conseqüentemente, nos índices de vegetação (Lichtenthaler et al., 1996).

Ao se considerar os sistemas a pleno sol e sombreados juntos, boas estimativas foram atingidas para as variáveis biomassa de folha + colmo ($R^2 = 0,75$), biomassa de folha ($R^2 = 0,80$) e IAF ($R^2 = 0,81$), uma vez que estas não consideram a porção de material morto (Tabela 3). Diversos estudos corroboram que a presença de material morto reduz a precisão dos índices de vegetação (Todd et al., 1998; Zhao et al., 2007; Flynn et al., 2008; Barnes et al., 2015). As porções de folha e colmo e de rebrota do pasto são mais importantes para a alimentação animal do que a porção de material morto na maior parte do ano e, portanto, a má precisão dos índices de vegetação para estimativa dessa última porção pouco limita seu uso nesse período. Entretanto, especificamente no período seco do ano, quando há falta de forragem de boa qualidade para alimentação animal, o material morto (seco), ainda que de má qualidade, pode ser utilizado como fonte energético-fibrosa da dieta, principalmente quando associado à suplementação proteica (Minson, 1990). Finalmente, o uso de apenas uma equação por variável para ambos os sistemas (Tabela 3) corrobora o potencial uso dessa ferramenta de forma ampla e generalista, principalmente nos períodos de baixa dependência do material morto para alimentação animal.

3 USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA DA EXTRAÇÃO DE NITROGÊNIO E DO TEOR DE PROTEÍNA DAS PASTAGENS

Sensores proximais podem gerar estimativas em tempo real do total de N extraído pelo pasto, podendo auxiliar na quantificação do N a ser repostado no so-

lo via adubação (Pezzopane et al., 2022), enquanto o monitoramento do teor de proteína do pasto pode auxiliar na adoção de estratégias para alimentação animal (Pullanagari et al., 2013). O teor de N na forragem consumida pelo animal tem impacto significativo em seu desempenho. Adicionalmente, quando o teor de proteína da forragem é menor que 7%, há diminuição na ingestão de matéria seca pelos animais (Silva et al., 2009) devido à falta de condições ideais para o desenvolvimento de microrganismos ruminais responsáveis pela utilização da fração energético-fibrosa da forragem (Minson, 1990).

Pezzopane et al. (2022) observaram boa relação entre o total de N presente na vegetação (N extraído pelo pasto) e o SRI ($R^2 = 0,77$, Tabela 4), demonstrando o potencial de índices proximais para auxílio na adubação nitrogenada. No entanto, a porcentagem de proteína bruta não foi bem correlacionada com os índices de vegetação, sendo o ChL o melhor índice para essa estimativa com R^2 de apenas 0,32 (Tabela 4), o que demonstra a necessidade de mais estudos para que sensores proximais com essas bandas espectrais possam ser utilizados para auxílio em estratégias de alimentação animal.

Alguns estudos demonstraram bons resultados com o uso de reflectância espectral para estimativa de proteína bruta e outras variáveis relacionadas ao valor nutritivo de grama-bermuda (Starks et al., 2006a; Starks et al., 2006b; Zhao et al., 2007; Starks et al., 2008). Em tais estudos, no entanto, foram utilizadas bandas diferentes daquelas disponíveis no instrumento utilizado nos estudos com braquiária (ACS-430 Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, USA); Pezzopane et al., 2019, 2022), demonstrando o potencial de uso de instrumentos com alta amplitude espectral para determinação do valor nutritivo de graminéas forrageiras tropicais.

4 CONCLUSÕES

Índices de vegetação calculados a partir da reflectância das bandas 670, 720 e 760 nm, medidos por sensores proximais, têm potencial para estimativa

de produtividade e extração de nitrogênio de cultivares de braquiária em sistemas de produção diversos. Dentre os índices utilizados, o SRI se mostrou o mais apropriado para estimativa de biomassa de pastagens altamente produtivas a pleno sol, enquanto o MSR se mostrou o mais apropriado para pastos sombreados. Com o acoplamento de sensores a sistemas de posicionamento global (GPS), mapas podem ser criados e, por meio de monitoramento em tempo real, as informações geradas podem auxiliar produtores na tomada de decisão. Adicionalmente, estudos com outras espécies forrageiras e outros sistemas e manejo de pastagens são necessários e desejáveis para calibração e desenvolvimento de equações específicas e adequadas para cada situação.

AGRADECIMENTOS

O estudo foi conduzido com suporte financeiro da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa – “Projeto Mata Atlântica” - 01.10.06.001.05.01), do CNPq (Grant nº 478067/20135) e da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Grant nº 2016/02959-1). José R. M. Pezzopane agradece pelo recebimento de bolsa ao CNPq (Grant nº 308723/2015-5), Cristiam Bosi agradece pelo recebimento de bolsa à FAPESP (Grant nº 2014/11931-8) e Patrícia M. Santos agradece pelo recebimento de bolsa ao CNPq (Grant nº 311287/2020-4).

REFERÊNCIAS

- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F. B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11119-014-9377-2>.
- BARNES, P.; WILSON, B. R.; REID, N.; BAYERLEIN, L.; KOEN, T. B.; OLUPOT, G. Examining the impact of shade on above-ground biomass and normalized difference vegetation index of C3 and C4 grass species in North-Western NSW, Australia. **Grass and Forage Science**, v. 70, n. 2, p. 324-334, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1111/gfs.12118>.
- CAO, Q.; MIAOA, Y.; WANGA, H.; HUANGA, S.; CHENGA, S.; KHOSLAA, R.; JIANGAA, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with crop circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, v. 154, p. 133-144, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.005>.
- CHEN, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 229-242, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178>.
- CISNEROS, A.; FIORIO, P.; MENEZES, P.; PASQUALOTTO, N.; VAN WITTENBERGHE, S.; BAYMA, G.; FURLAN NOGUEIRA, S. Mapping productivity and essential biophysical parameters of cultivated tropical grasslands from sentinel-2 imagery. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 711, 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/agronomy10050711>.
- CRESTANI, S. **Respostas morfológicas e dinâmica da população de perfilhos e touceiras em Brachiaria brizantha cv Piatã submetida a regimes de sombra em área de integração lavoura-pecuária-floresta**. 2015. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- FLYNN, S. E.; DOUGHERTY, C. T.; WENDROTH, O. Assessment of pasture biomass with the normalized difference vegetation index from active ground-based sensors. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 1, p. 114-121, 2008. DOI: <http://doi.org/10.2134/agronj2006.0363>.
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9).
- GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. 2005GL022688, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1029/2005GL022688>.
- LI, Z.; GUO, X. A suitable vegetation index for quantifying temporal variation of leaf area index (LAI) in semiarid mixed grassland. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 6, p. 709-721, 2010. DOI: <http://doi.org/10.5589/m11-002>.
- LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; DÖLL, M.; FIETZ, H. J.; BACH, T.; KOZEL, U.; MEIER, D.; RAHMSDORF, U. Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. **Photosynthesis Research**, v. 2, n. 2, p. 115-141, 1981. DOI: <http://doi.org/10.1007/BF00028752>.
- LICHTENTHALER, H. K.; GITELSON, A.; LANG, M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3-4, p. 483-493, 1996. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80283-5](http://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80283-5).
- MINSON, D. **Forage in ruminant nutrition**. Queensland: Academic Press, 1990. 502 p.
- MUTANGA, O.; SKIDMORE, A. K. Narrowband vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 19, p. 3999-4014, 2004. DOI: <http://doi.org/10.1080/01431160310001654923>.
- PALLOTTINO, F.; ANTONUCCI, F.; COSTA, C.; BISAGLIA, C.; FIGORILLI, S.; MENESATTI, P. Optoelectronic proximal sensing vehicle-mounted technologies in precision agriculture: a review. **Computers and Electronics**

- in **Agriculture**, v. 162, p. 859-873, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.034>.
- PARSONS, A. J.; PENNING, P. D. The effect of duration of regrowth on photosynthesis, leaf death and average rate of growth in a rotationally grazed sward. **Grass and Forage Science**, v. 43, n. 1, p. 15-27, 1988. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1988.tb02137.x>.
- PARUELO, J. M.; EPSTEIN, H. E.; LAUENROTH, W. K.; BURKE, I. C. Anpp estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecology**, v. 78, n. 3, p. 953-958, 1997. DOI: [http://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0953:AEFNFT\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0953:AEFNFT]2.0.CO;2).
- PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; CRIPPA, P. H.; SANTOS, P. M.; NARDACHIONE, E. C. Assessment of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 130-139, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; SENGLING, O.; BONANI, W. L.; BRUNETTI, H. B.; SANTOS, P. M. Estimating productivity and nutritive value of Marandu palisadegrass using a proximal canopy reflectance sensor. **Experimental Agriculture**, v. 58, p. e28, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1017/S0014479722000242>.
- PULLANAGARI, R. R.; YULE I. J.; TUOHY, M. P.; HEDLEY, M. J.; DYNES, R. A.; KING, W. M. Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectral radiometry. **Grass and Forage Science**, v. 68, n. 1, p. 110-119, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00877.x>.
- RODRIGUEZ, D.; FITZGERALD, G. J.; BELFORD, R.; CHRISTENSEN, L. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop ecophysiological concepts. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 7, p. 781-789, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1071/AR05361>.
- ROUSE JUNIOR, J. W. **Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation**. Greenbelt, MD, USA: NASA/GSFC, Type III Final Report, 1974, 371 p.
- SCHELLBERG, J.; HILL, M. J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: applications, perspectives and constraints. **European Journal of Agronomy**, v. 29, n. 2-3, p. 59-71, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.005>.
- SILVA, F. F. D.; SÁ, J. F. D.; SCHIO, A. R.; ÍTAVO, L. C. V.; SILVA, R. R.; MATEUS, R. G. Suplementação a pasto: disponibilidade e qualidade x níveis de suplementação x desempenho. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 1, p. 371-389, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300037>.
- STARKS, P. J.; ZHAO, D.; PHILLIPS, W. A.; COLEMAN, S. W. Development of canopy reflectance algorithms for real-time prediction of bermudagrass pasture biomass and nutritive values. **Crop Science**, v. 46, n. 2, p. 927-934, 2006a. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0258>.
- STARKS, P. J.; ZHAO, D.; PHILLIPS, W. A.; COLEMAN, S. W. Herbage mass, nutritive value and canopy spectral reflectance of bermudagrass pastures. **Grass and Forage Science**, v. 61, n. 2, p. 101-111, 2006b. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00514.x>.
- STARKS, P. J.; ZHAO, D.; BROWN, M. A. Estimation of nitrogen concentration and in vitro dry matter digestibility of herbage of warm-season grass pastures from canopy hyperspectral reflectance measurements. **Grass and Forage Science**, v. 63, n. 2, p. 168-178, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00619.x>.
- TEAL, R. K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K. W.; ARNALL, D. B.; WALSH, O.; RAUN, W. R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 6, p. 1488-1494, 2006. DOI: <http://doi.org/10.2134/agronj2006.0103>.
- TODD, S. W.; HOFFER, R. M.; MILCHUNAS, D. G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 427-438, 1998. DOI: <http://doi.org/10.1080/014311698216071>.
- TROTTER, M. G.; LAMB, D. W.; DONALD, G. E.; SCHNEIDER, D. A. Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. **Crop & Pasture Science**, v. 61, n. 5, p. 389-398, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1071/CP10019>.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- ZHAO, D.; STARKS, P. J.; BROWN, M. A.; PHILLIPS, W. A.; COLEMAN, S. W. Assessment of forage biomass and quality parameters of bermudagrass using proximal sensing of pasture canopy reflectance. **Grassland Science**, v. 53, n. 1, p. 39-49, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2007.00072.x>.