

ISSN 0104-1347

# Evolução temporal do NDVI e sua relação com variáveis biofísicas em *Paspalum notatum*

## NDVI temporal evolution and its relationship with biophysical variables on *Paspalum notatum*

Eliana Lima da Fonseca<sup>1</sup>; Denise Cybis Fontana<sup>2</sup>; Luis Mauro Gonçalves Rosa<sup>3</sup>;

**Resumo:** Este trabalho teve por objetivo avaliar a evolução temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em *Paspalum notatum* Flügge var. *notatum*, durante o período de crescimento desta gramínea e relacionar o NDVI e as variáveis biofísicas índice de área foliar, matéria seca total e matéria seca de folhas, através de modelos estatísticos. Para tanto, foi realizado um experimento na Estação Experimental Agronômica (EEA/UFRGS, 30°05'22"S, 51°39'08"W), onde foram feitas medições em parcelas de adubadas com diferentes doses de nitrogênio (0, 200, 400 kg.ha<sup>-1</sup>). Os resultados mostraram que o NDVI pode ser utilizado como um estimador de parâmetros de crescimento, principalmente para baixas e médias densidades de biomassa, sendo que os parâmetros melhor relacionados ao NDVI são aqueles que expressam a porção fotossintetizante da vegetação (folhas verdes).

**Palavras-chave:** reflectância, radiometria terrestre, campo nativo

**Summary:** The objective of this paper was to evaluate the temporal evolution of the normalized difference vegetation index (NDVI) on *Paspalum notatum* Flügge var. *notatum*, during its growth period, and correlate, using statistical models, the NDVI and the biophysical variables. The experiment was carried out at the Estação Experimental Agronômica (EEA/UFRGS, 30°50'22"S, 51°39'08"W), on plots fertilized with different levels of nitrogen (0, 200 and 400 kg.ha<sup>-1</sup>). The results showed that NDVI may be used to estimate growth parameters, especially at low and medium biomass densities. The best biomass parameters correlated with NDVI are those that represent the photosynthetic portion of the vegetation (green leaves).

**Key words:** reflectance, terrestrial radiometry, native grasslands

### Introdução

A resposta espectral da vegetação pode ser incorporada em modelos de crescimento ou de produtividade vegetal através da utilização de índices de vegetação, que são calculados utilizando combinações matemáticas da resposta espectral dos alvos em diferentes faixas de comprimento de onda. Os índices de vegetação representam uma alternativa para melhor discriminar a vegetação e avaliar as diferenças nas condições de crescimento, com a

vantagem de diminuir o volume de dados a serem manipulados (VAN DIJK et al., 1989). Estes índices possuem uma relação de dependência com as características estruturais e fisiológicas da vegetação. A geometria do dossel (ângulo de inserção, distribuição, orientação, espaçamento das folhas), o teor de pigmentos, principalmente a clorofila, o conteúdo de água e o grau de senescência da vegetação, bem como os estresses ambientais ou nutricionais aos quais as plantas estão submetidas, são os principais fatores que modificam a

<sup>1</sup> Enga. Agra., Dr<sup>a</sup>., Prof<sup>a</sup> Adjunto, Dep. Geografia, Instituto de Geociências, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Inst. Geociências, CEP 91501-970, Porto Alegre -RS. E-mail: eliana.fonseca@ufrgs.br.

<sup>2</sup> Eng<sup>a</sup>. Agr<sup>a</sup>., Dr<sup>a</sup>., Prof<sup>a</sup> Adjunto, Dep. Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Fac. Agronomia, UFRGS. Bolsista do CNPq. E-mail: dfontana@ufrgs.br.

<sup>3</sup> Biol. PhD, Prof Adjunto, Dep. Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Fac. Agronomia, UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq. E-mail: lmrosa@ufrgs.br.

reflectância de um dossel, modificando, em consequência, os valores dos índices de vegetação (PATEL et al., 1985; GOEL, 1988; BARET & GUYOT, 1991). Uma grande vantagem é que os índices de vegetação podem ser utilizados em estudos de monitoramento das condições de desenvolvimento das culturas agrícolas em grandes áreas, ao longo da estação de crescimento, com um baixo custo operacional, se compararmos o custo das imagens de satélite com o custo para a realização de trabalhos em campo em grandes áreas cultivadas. As mudanças estruturais que a vegetação apresenta ao longo do ciclo fenológico promovem mudanças gradativas nas propriedades espectrais da mesma, definindo um padrão de evolução temporal da reflectância nos diferentes comprimentos de onda (FONTANA et al., 1996), bem como nos valores calculados dos índices de vegetação. O conhecimento deste padrão de evolução temporal das variáveis espectrais de um determinado tipo de vegetação é o que possibilita monitorar as condições de crescimento e desenvolvimento da vegetação, principalmente quando em associação com os dados meteorológicos.

O *Paspalum notatum* (grama forquilha), objeto de estudo neste trabalho, é uma das espécies mais comuns na formação dos campos naturais do Estado do Rio Grande do Sul. Devido a extensão da área ocupada pelo bioma Campos Sulinos, equivalente a 44% da área total do Estado, segundo o último Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2003), e devido a importância econômica e social da vegetação destes campos, que são utilizados como suporte alimentar para a criação extensiva de bovinos e ovinos, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento do rendimento desta vegetação é de fundamental importância para economia desta região. Assim, este trabalho teve por objetivo caracterizar a evolução temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em *Paspalum notatum* Flügge var. *notatum* durante o período de crescimento da cultura, obtidos com dados de reflectância coletados em campo, verificar a capacidade deste índice em representar as variações do dossel durante as diferentes etapas do ciclo fenológico do *Paspalum notatum* e relacionar através de modelos estatísticos o NDVI com as variáveis biofísicas da vegetação: matéria seca total, matéria seca verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel.

## Material e Métodos

O *Paspalum notatum* Flügge var. *notatum*, ecótipo André da Rocha (grama forquilha), foi plantado em parcelas de 4 m x 12 m, na Estação Experimental Agrônômica da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Eldorado do Sul (30°06'S, 51°39'W, altitude 46 metros). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é subtropical úmido, de verão quente, do tipo Cfa (BERGAMASCHI & GUADAGNIN, 1990). O solo da área experimental é um argissolo vermelho (EMBRAPA, 1999).

No início do período experimental (16 de novembro de 1998) a área foi cortada com roçadeira tratorizada para a uniformização das parcelas, já que as mesmas foram implantadas em janeiro de 1995. Também em 16 de novembro de 1998 foi realizada a adubação que consistiu da aplicação de 60 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 60 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, em toda a área experimental. A adubação nitrogenada foi efetuada em única aplicação, nesta mesma data, correspondendo aos tratamentos N0 (nenhum nitrogênio aplicado), N200 (200 kgN.ha<sup>-1</sup> ou 100% da dose recomendada) e N400 (400 kgN.ha<sup>-1</sup> ou 200% da dose recomendada através da análise de solo) nas parcelas referentes a cada tratamento. O objetivo da adubação nitrogenada foi promover variações na quantidade de biomassa acumulada durante o período experimental. A área experimental foi irrigada por aspersão durante todo o período experimental, com o objetivo de evitar a ocorrência de déficit hídrico na vegetação. Durante o curso do experimento foram feitos mais dois cortes para diminuir a quantidade de biomassa dos canteiros, aos 58 (13/jan/1999) e aos 84 (8/fev/1999) dias após o início do experimento.

No período de novembro de 1998 a fevereiro de 1999 foi calculada a reflectância das parcelas de *Paspalum notatum*, obtida pela razão entre a radiância do dossel e a radiância de uma superfície lambertiana ideal (referência), medidas simultaneamente. As medições nas diferentes parcelas foram realizadas aos 11 (27/nov/1998), 33 (19/dez/1998), 44 (30/dez/1998), 60 (15/jan/1999), 66 (21/jan/1999) e 87 (11/fev/1999) dias após o início do experimento. O equipamento utilizado foi um espectrorradiômetro, marca GER modelo MARK5, com resolução espectral de 3 nm nos

comprimentos de onda entre 350 nm e 1100 nm. O espectrorradiômetro foi instalado em um tripé de forma que as medições foram tomadas a 2 m acima do topo do dossel, estabelecendo uma área de visada (FOV) de 0,14 m x 0,21 m ou 0,03 m<sup>2</sup>. A referência utilizada foi uma placa plana, marca LABSPHERE modelo SRT-50-050, com espectro de reflectância conhecido. Foram realizadas três medições em cada parcela dos diferentes tratamentos, entre 11 e 13 horas; as medições neste horário visaram a redução do efeito do ângulo solar sobre a reflectância da vegetação.

A partir da média da reflectância medida nas porções do vermelho (630 a 690 nm) e do infravermelho próximo (760 a 900 nm) foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Equação 1) (ROUSE, et al., 1973). Estes intervalos de comprimento de onda foram selecionados por simularem os intervalos das bandas 3 e 4 do sensor TM/Landsat 5, que é um sensor que apresenta um grande histórico tanto de imageamento sistemático, como de trabalhos com o monitoramento da cobertura vegetal.

$$NDVI = \frac{(\rho_{IV} - \rho_V)}{(\rho_{IV} + \rho_V)} \quad (1)$$

Para as medições das variáveis biofísicas da vegetação foram coletadas amostras de plantas em uma área de 0,03 m<sup>2</sup> (0,15 m x 0,20 m). Foram coletadas três repetições por tratamento para cada data de medição. Todo o material vegetal da área amostrada foi cortado rente ao solo e separado em material morto, colmo e folhas verdes. O material morto foi desprezado devido não ser pastejado pelos animais e as demais porções foram secas em estufa com ar forçado a 60°C até atingir peso constante, obtendo-se assim a matéria seca de folhas (MSF) e matéria seca de colmo (MSC), sendo a matéria seca total (MST) calculada através da soma destas. Parte do material de folhas da amostra foi utilizada para calcular a área foliar específica. Foram medidos, aproximadamente, 100 cm<sup>2</sup> de área foliar com um planímetro ótico eletrônico, marca Li-cor, modelo LI-3100+1 e as folhas medidas foram secas separadamente das demais até atingirem peso constante em estufa com ar forçado a 60°C. A área foliar medida foi dividida pela matéria seca, obtendo-se a área foliar específica em cada tratamento. O índice de área foliar (IAF) foi obtido multiplicando-se a área foliar específica pelo

peso da matéria seca verde e dividido-se pela área de terreno amostrado.

As medições de radiação solar sobre o dossel foram feitas utilizando células de silício amorfo montadas em barras de alumínio, calibradas em relação a um sensor quantum, marca Li-cor, modelo LI190SB conforme descrito por PANDOLFO et al. (1993). Para a medição da radiação fotossinteticamente ativa refletida pela cultura (*PAR<sub>rc</sub>*), foram instaladas a 1 m acima do topo do dossel, voltadas para a cultura, barras de alumínio de aproximadamente 1 m de comprimento, contendo 5 células de silício amorfo ligadas em série e espaçadas de 15 cm. A radiação fotossinteticamente ativa transmitida (*PAR<sub>t</sub>*) foi medida usando 5 barras de alumínio de 4cm de comprimento, cada uma contendo uma célula de silício amorfo e ligadas em série, montadas no interior do dossel, voltadas para cima. Todas as barras foram ligadas a um acumulador de dados computadorizado da marca Campbell, modelo CR-10, que registrou as leituras no mesmo período em que as medições com o espectrorradiômetro foram realizadas.

A radiação solar global (*R<sub>g</sub>*) foi medida com um piranômetro marca LI-COR, modelo LI200SZ, acoplado a uma estação meteorológica automática localizada próxima da área experimental. A radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel (*PAR<sub>i</sub>*) foi obtida através da relação apresentada por FRANÇA et al. (1997):

$$PAR_i = 0,43 * R_g \quad (2)$$

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (*PAR<sub>a</sub>*) foi calculada a partir da equação de balanço de radiação (NORMAN & ARKEBAUER, 1991):

$$PAR_a = PAR_i - PAR_{rc} - PAR_t \quad (3)$$

Como o *Paspalum notatum* é uma cultura rasteira que cobre totalmente o solo, a radiação refletida pelo solo não foi considerada no cálculo da PAR absorvida pelo dossel.

## Resultados e Discussão

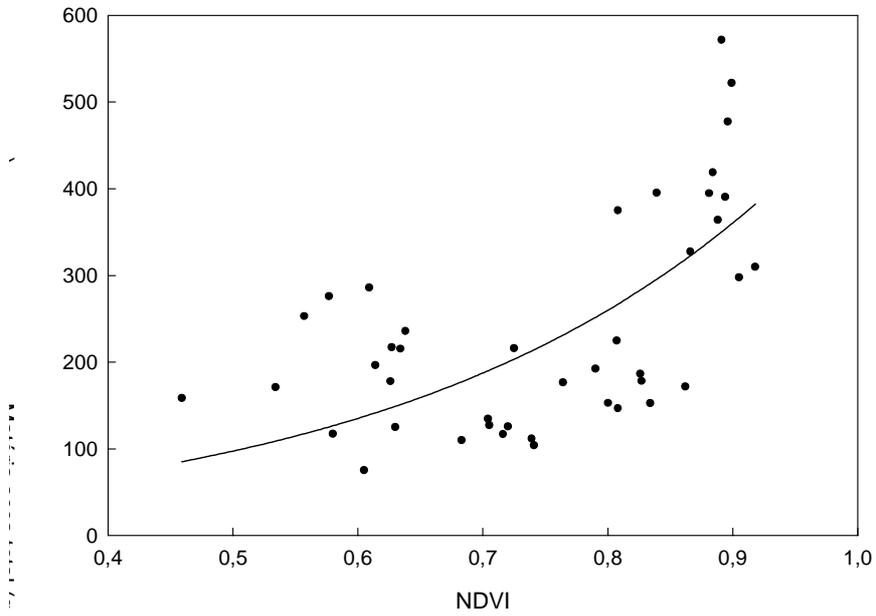
Verificou-se que as variações nos valores médios do NDVI apresentaram padrões semelhantes

aos padrões de variação apresentados pelos valores médios das variáveis biofísicas em *Paspalum notatum*, tanto no índice de área foliar (IAF) quanto na matéria seca total (MST) e matéria seca de folhas (MSF) dentro de um mesmo tratamento (Tabela 1). Isto demonstra que os distintos padrões de crescimento de uma mesma espécie (que neste trabalho foram obtidos através das variações na quantidade de nitrogênio aplicado) determinam os padrões de evolução temporal do índice de vegetação. A adubação nitrogenada promove um aumento na quantidade de pigmentos fotossintéticos, principalmente a clorofila, que aumenta a captação da energia radiante incidente pela vegetação (MARSCHNER, 1990; NOBEL et al., 1993). Nas medições com maior quantidade de biomassa

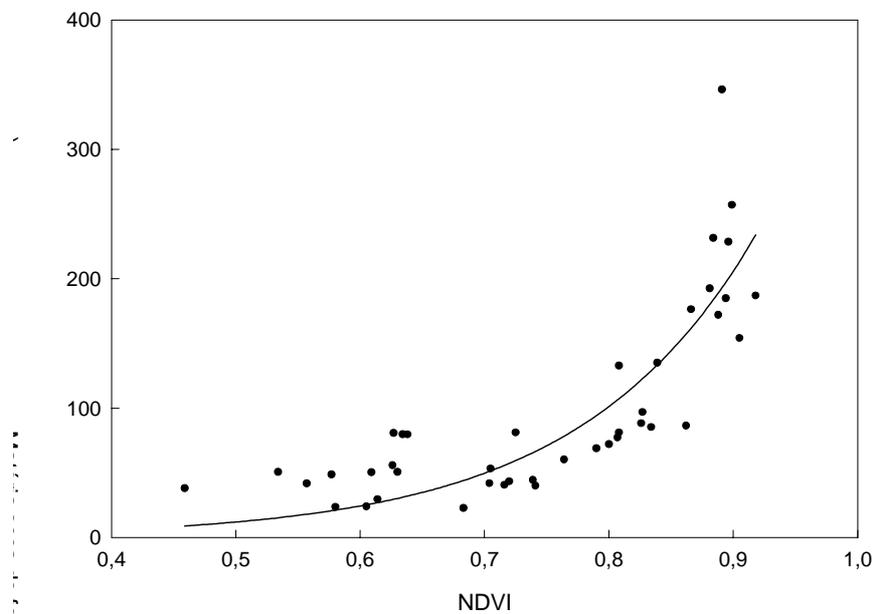
acumulada foram observados os maiores valores de NDVI, devido à diminuição da reflectância do dossel na porção do vermelho, ocasionada pelo aumento da absorção da radiação, consequência direta do aumento da quantidade de pigmentos fotossintetizantes (KNIPLING, 1970; TUCKER, 1973) e devido ao aumento na reflectância do dossel na porção do infravermelho, ocasionada pelo aumento do espalhamento da radiação no interior de um maior número de folhas (WOOLLEY, 1971; THOMAS & GAUSMAN, 1977). Estas variações na resposta espectral nas porções do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético em *Paspalum notatum* podem ser mais bem analisadas nos resultados apresentados por FONSECA et al. 2002. A diminuição nos valores de

**Tabela 1.** Valores médios do índice de área foliar (IAF), matéria seca de folhas (MSF), matéria seca total (MST) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtidos em *Paspalum notatum* nas diferentes datas de medição nos tratamentos N0, N200 e N400.

Datas de medição	IAF	MSF (g.m <sup>-2</sup> )	MST (g.m <sup>-2</sup> )	NDVI
<b>N0</b>				
27/nov/1998	1,3	43,8	108,9	0,682
19/dez/1998	1,4	45,6	115,4	0,696
30/dez/1998	1,8	62,3	187,5	0,777
15/jan/1999	1,0	34,9	135,3	0,519
21/jan/1999	1,3	42,2	134,3	0,696
11/fev/1999	0,7	23,0	70,6	0,586
<b>N200</b>				
27/nov/1998	2,5	84,3	157,0	0,835
19/dez/1998	5,3	177,2	360,9	0,893
30/dez/1998	5,6	186,0	363,5	0,877
15/jan/1999	1,1	37,0	219,2	0,586
21/jan/1999	2,3	76,6	224,2	0,645
11/fev/1999	1,3	43,1	152,9	0,614
<b>N400</b>				
27/nov/1998	2,6	85,7	172,5	0,817
19/dez/1998	7,6	254,9	433,5	0,898
30/dez/1998	7,9	263,8	541,2	0,898
15/jan/1999	1,5	50,2	268,9	0,593
21/jan/1999	3,8	127,7	354,7	0,770
11/fev/1999	2,4	80,5	216,2	0,662



**Figura 1.** Relação entre a matéria seca total (MST) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em *Paspalum notatum*. EEA/UFRGS - Eldorado do Sul, 1998/1999.



**Figura 2.** Relação entre a matéria seca das folhas (MSF) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em *Paspalum notatum*. EEA/UFRGS - Eldorado do Sul, 1998/1999.

IAF, MSF e MST e a conseqüente diminuição nos valores do NDVI nos dias 15 de janeiro e 11 de fevereiro foram conseqüência dos cortes realizados nos dias 13 de janeiro e 8 de fevereiro, os quais foram necessários devido excessivo acúmulo de biomassa no tratamento N400, não característico deste espécie em condições de pastejo.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os modelos de regressão desenvolvidos a partir das relações existentes entre o NDVI e as variáveis biofísicas MST e MSF. Para a avaliação destas relações foram utilizados todos os valores de todas as repetições coletadas em campo, num total de 42 observações. Sabe-se que o NDVI apresenta uma relação exponencial com essas variáveis de biomassa da vegetação (RIPPLE, 1984), uma vez que aumentos constantes na quantidade de folhas verdes não promovem aumentos proporcionais na quantidade de energia refletida no infravermelho próximo, como demonstrado por GAUSMAN et al. (1976) e devido a contribuição das folhas mortas presentes no interior do dossel na reflectância do mesmo (SELLERS, 1985), que promove incrementos na reflectância, tanto na faixa do vermelho quanto na faixa do infravermelho próximo. Por este motivo as curvas foram ajustadas utilizando um modelo de regressão exponencial para relacionar as variáveis de interesse. Como o objetivo deste tipo de estudo é fazer predições sobre a disponibilidade de biomassa da vegetação, as variáveis MST e MSF foram definidas como a variável dependente e o NDVI foi definido como a variável independente, apesar da resposta espectral ser dependente da condição em que a vegetação se apresenta no momento da aquisição dos dados espectrais. Optou-se por não avaliar as relações com o IAF uma vez que este índice foi estimado a partir dos valores de MSF.

A relação entre o NDVI e MST (Figura 1) apresentou um baixo coeficiente de determinação (0,40), não significativo para  $\alpha = 5\%$ . Como a MST considera também o peso dos órgãos não responsáveis pela absorção da radiação e como os valores do NDVI são diretamente influenciados pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (GAMON et al., 1995), os resultados observados nesta relação são coerentes com os resultados esperados.

GAMON et al. (1995), trabalhando com espécies herbáceas nativas, encontram resultados

semelhantes aos observados na relação entre NDVI e MSF (Figura 2). Segundo estes autores, quando o índice de vegetação é correlacionado com a parte da vegetação responsável pela fotossíntese (folhas) existe um melhor ajuste das funções de regressão, também observados por VAN DIJK et al. (1989) e JENSEN et al. (1990), em trabalhos com soja e aveia, respectivamente. Para o uso desta metodologia é necessário que a variável dependente apresente distribuição normal dos valores em relação à média, já que a análise de resíduos é feita sobre esta variável (SOUZA, 1998), sendo verificada a normalidade dos dados nesta análise. A relação entre o NDVI e MSF apresentou coeficiente de determinação de 0,72. PARUELO et al. (1997) obtiveram um coeficiente de determinação de 0,92 utilizando a média de 3 anos de produção medida em 19 pontos em uma relação exponencial com a integração anual do NDVI (medido pelo sensor AVHRR/NOAA) para gramíneas da região central dos Estados Unidos. PARUELO et al. (2000) estudando a vegetação campestre natural da Argentina, que apresenta muita semelhança com a vegetação do bioma *Campos Sulinos* (DEREGIBUS, 2000) obtiveram um coeficiente de determinação de 0,74 utilizando 35 pontos para a estimativa, coletados em diferentes datas, sendo que os autores relacionaram através de um modelo linear a biomassa aérea acumulada em um período entre 35 a 95 dias e o NDVI (medido pelo sensor TM/Landsat). Não foram encontrados dados na literatura relacionando, através de relações exponenciais, medições espectrais em vegetação campestre natural feitas com espectrorradiômetro. Comparando os resultados obtidos por estes autores com os resultados obtidos neste trabalho verifica-se que existem fortes relações entre a biomassa aérea da vegetação campestre natural com a resposta espectral desta vegetação representada pelos valores do NDVI.

Foi observado uma tendência de saturação dos valores do NDVI próximo ao valor 0,90, associado a valores de MSF próximos a 200 gm<sup>-2</sup>, indicando que incrementos na quantidade de MSF não provocam incrementos nos valores do índice de vegetação, o que demonstra a limitação do NDVI em estimar esta variável em condições de alta densidade de biomassa. Cabe ressaltar que os campos naturais do Rio Grande do Sul (nos quais o *Paspalum notatum* é uma das espécies predominantes na composição florística) não apresentam uma grande quantidade de biomassa acumulada sob condições de pastejo, o que indica a

possibilidade do seu monitoramento com o auxílio de dados obtidos através de sensoriamento remoto orbital.

Para a avaliação da relação entre a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (*PAR<sub>a</sub>*) e o NDVI foram utilizados todos os valores de todas as repetições coletadas em campo, num total de 33 observações. Estas duas variáveis apresentaram uma relação linear crescente, com um coeficiente de correlação linear (R) de 0,58. Vários trabalhos demonstraram que os índices de vegetação podem ser utilizados para a estimativa da quantidade da radiação solar fotossinteticamente ativa incidente que é absorvida ou interceptada pelo dossel, sendo estes parâmetros muito utilizados em modelagem de crescimento vegetal (STEINMETZ et al., 1990; RUIJMY et al. 1994; PARUELO et al., 1997). O baixo valor do coeficiente de determinação encontrado neste trabalho (significativo para  $\alpha = 5\%$ ) foi consequência de problemas operacionais nas medições da radiação. Enquanto a radiação fotossinteticamente ativa transmitida e refletida pelo dossel foram integradas em cada dois minutos a radiação solar global foi integrada em cada quinze minutos. Esta disparidade de critério de medição fez com que, por vezes, os valores da radiação solar global sofressem a influência da cobertura de nuvens, as quais estavam ausentes no momento das medições da radiação, tornando a média dos quinze minutos inferior à radiação incidente que realmente incidia sobre o dossel no momento das demais medições (PAR e radiação). Nestes casos estas medições foram desconsideradas da análise o que fez com que o conjunto de dados fosse menor que o conjunto de dados das demais análises deste trabalho. Ainda assim, observou-se um aumento dos valores do NDVI associado ao aumento dos valores da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel, indicando sensibilidade do NDVI às mudanças na quantidade de radiação absorvida pelo dossel. Em trabalhos futuros, portanto, deve ser observada a simultaneidade das observações de R<sub>g</sub> e PAR.

### Conclusões

1. A evolução temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) expressa as variações sazonais da quantidade de biomassa em *Paspalum notatum*, dentro de um mesmo tratamento de nitrogênio aplicado.

2. O NDVI pode ser utilizado como um estimador das variáveis biofísicas em *Paspalum notatum*, principalmente para baixa e média densidades de biomassa, sendo que os parâmetros melhor relacionados ao NDVI são aqueles que expressam a porção fotossintetizante da vegetação (folhas verdes).

### Agradecimentos

Ao Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM/UFRGS), pelo empréstimo do espectrorradiômetro; a CAPES, pela bolsa concedida à primeira autora.

### Referências Bibliográficas

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, p.161-173, 1991.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da estação experimental agrônômica da UFRGS**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1990. 96 p.

DEREGIBUS, V.A. Argentina's humid grazing lands. In: LELAIRE, G. et al. **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Cambridge: CABI Publishing, 2000. cap.20, p.395-405.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI, 1999. 412p.

FONSECA, E.L., et al. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.3, p. 365-371, 2002.

FONTANA, D.C., et al. Evolução do índice de vegetação global no oeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.2, p.117-122, 1996.

FRANÇA, S., et al. Radiação fotossinteticamente ativa e sua relação com a radiação solar global em dossel de alfafa, em função do índice de área foliar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.147-153, 1997.

- GAMON, J.A., et al. Relationships between NDVI, canopy Structure and photosynthesis in three californian vegetation types. **Ecological Applications**, New Jersey, v. 5, n. 1, p. 28-41, 1995.
- GAUSMAN, H.W., et al. Infinite reflectance of dead compared with live vegetation. **Agronomy Journal**, v. 68, n. 2, p. 295-296, 1976.
- GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, London, v.4, p. 1-212, 1988.
- IBGE Censo Agropecuário Brasileiro, 1995. Disponível em <http://www.ibge.gov.br> . 2003
- JENSEN, A., et al. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee v.11, n.10, p. 1890-1820, 1990.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3. p.155-159, 1970.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1990. 674p.
- NOBEL, P.S. et al. Canopy structure and light interception. In: HALL, D.O., et al. **Photosynthesis and production in a changing environment**. London: Chapman & Hall, 1993. p 79 - 90
- NORMAN, J.M.; ARKEBAUER, T.J. Predicting canopy light-use efficiency from leaf characteristics In: ASA-CSSA-SSA **Modeling plant and soil systems** Agronomy Monograph, 31. Madison :ASA-CSSA-SSA 1991. p. 125 -143.
- PANDOLFO, C.; BERGAMASCHI, H.; NABINGER, C. Montagem de células de silício amorfo para medição de radiação fotossinteticamente ativa (PAR - 400 a 700 nm). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8, 1993, Porto Alegre. **Resumos...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1993 p. 94.
- PARUELO, J.M.; EPSTEIN, H.E.; LAUENROTH, W.K. et al. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecology**, Washington, v.78, n.3, p. 953-958, 1997.
- PARUELO, J.M., et al. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. **Applied Vegetation Science**, v.3, n.2, p.189-195, 2000.
- PATEL, N.K., et al. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee, v.6, n.5, p. 657-664. 1985.
- RIPPLE, W.J. **Relationships between grass canopy characteristics and Landsat Thematic Mapper**. 1984. 109p. Thesis (Ph.D. Thesis) - Oregon State University, Oregon. 1984.
- ROUSE, J.W., et al. Monitoring vegetation systems in the great plants with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington, DC. **NASA SP-351**. Washington, DC: NASA, v.1, p. 309-317, 1973.
- RUIMY, A., et al. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.99, n.D3, p. 5263-5283, 1994.
- SELLERS, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.8, p.1335-1372, 1985.
- SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não linear**. Brasília: Embrapa, 1998. 505p.
- STEINMETZ, S., et al. Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee, v.11, n.10, p.1797-1808, 1990.
- THOMAS, J.R.; GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agronomy Journal**, v.69, n.5, p.799-802, 1977.
- TUCKER, C.J. **The remote estimation of a grassland canopy / its biomass, chlorophyll, leaf water, and underlying soil spectra**. 1973. 212p. Thesis (Master Degree) - Colorado State University, Fort Collins. 1973.

VAN DIJK, A., et al. Comparison of vegetation indices derived from NOAA/AVHRR data for sahelian crop assessments. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.46, p. 23-49, 1989.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v.47, n.3, p.656-662, 1971.