

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

MODELO PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO EM TRIGO E
CEVADA PELO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA

Daniel Santos Grohs
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Área de Concentração Plantas de Lavoura

Porto Alegre (RS), Brasil
Março de 2008

***“Se você não comete erros, nunca poderá tomar decisões.
E quando erro, quero ser capaz de explicar estes erros.
Por isso, só faço aquilo que entendo totalmente”***

Warren Buffett

AGRADECIMENTOS

À Deus por ser presente e me conduzir pelas portas da vida.

Aos meus pais Hildo e Maria, pelo apoio a todas minhas decisões e exemplo de vida do qual me orgulho.

Ao Prof. Claudio Mario Mundstock, orientador e amigo, por minha formação científica ao longo destes oito anos de orientação e conselhos indispensáveis na minha jornada até este momento.

À Amanda, pela presença, paciência, compreensão e por me ouvir.

À minha irmã Francine e minha família, por saber que sempre estarão ao meu lado e posso contar para sempre.

Ao Prof. Christian Bredemeier, por trazer as novas informações que delinearam este trabalho e no auxílio na execução dos ensaios de campo.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e momentos de alegria sincera. Em especial à Naracelis colega de idéias e brigas durante estes anos com os trabalhos em cereais de inverno.

À todas as pessoas especiais que em algum momento atravessaram o meu caminho e contribuíram para o meu crescimento.

MODELO PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO EM TRIGO E CEVADA PELO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA¹

Autor: Daniel Santos Grohs

Orientador: Prof. Claudio Mario Mundstock

Co-orientador: Prof. Christian Bredemeier

RESUMO

O potencial produtivo de trigo e cevada é um dos conceitos utilizados para estimar a condição nutricional das plantas e sua relação com o rendimento de grãos. O manejo racional da adubação nitrogenada requer o estudo de variáveis que expressem de maneira mais dinâmica este potencial por ocasião da emissão da sexta folha. Os instrumentos, baseados em sensoriamento remoto terrestre (como o GreenSeeker), poderão vir a ser uma ferramenta promissora para este fim. Para isso, foram conduzidos, na EEA da UFRGS, em Eldorado do Sul - RS, nos anos de 2006 e 2007 estudos, tendo por objetivo principal: desenvolver e validar um modelo para estimar classes de potencial produtivo a partir de leituras de NDVI relacionadas a uma variável de planta. E, mais especificamente, caracterizar o efeito dos elementos da superfície de fundo (solo mais resíduo) e dos elementos meteorológicos que influenciam nas leituras de NDVI do dossel. As maiores modificações do NDVI foram determinadas pelo tipo de resíduo (milho e soja), presença de solo exposto, umidade do solo e molhamento do dossel e solo. Estes elementos geraram o modelo de correção do NDVI, a ser validado futuramente em lavouras. A variável mais correlacionada ao NDVI do dossel foi a biomassa acumulada na parte aérea. Sobre esta relação, foi gerado novo modelo, ajustando-se quatro classes de potencial produtivo (baixo, médio, alto e muito alto) para os resíduos de milho e soja. A validação deste modelo foi realizada em lavoura, no ano de 2006, em Victor Graeff - RS. Verificou-se correlação, na variabilidade espacial, das classes de potencial produtivo, geradas pelo NDVI, com a biomassa. O modelo gerado é aplicável a longo prazo, pois eliminou as diferenças entre cultivares e espécies. Apesar da baixa correspondência destas classes com o rendimento de grãos, foi alta a correspondência com a eficiência de uso do N pelas plantas, sendo os maiores valores de NDVI coincidentes com as menores eficiências. Trabalhos futuros deverão relacionar diferentes tipos de resposta ao N, em cada classe de potencial produtivo, visando adequar as doses a serem aplicadas.

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (124 p.) Março, 2008.

MODEL FOR YIELD POTENTIAL ESTIMATION IN WHEAT AND BARLEY BY THE NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX¹

Author: Daniel Santos Grohs

Advisor: Prof. Claudio Mario Mundstock

Co-advisor: Prof. Christian Bredemeier

ABSTRACT

Wheat and barley yield potential is a new concept used to predict plant nutritional demands and their relationship with grain yield. Rational nitrogen management requires variables which express plant's yield potential in real-time at 6-leaf-stage. A new methodology using a sensor based on proximal remote sensing (GreenSeeker) was tested in several experiments carried out at EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, in 2006 and 2007. Background effects (soil surface and mulch straw) and meteorological elements on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were determined and a model based on classes was developed to estimate yield potential on an agronomic trait. NDVI was affected by crop residue straw (corn or soybean), bare soil, soil humidity and dew. NDVI was correlated to shoot dry biomass and the generated model was based on four yield biomass potential classes (low, medium, high and very high) for corn and soybean residues. The model was validated on a 7 ha wheat crop area and a strong correlation was found between yield potential classes (NDVI) and shoot dry biomass. Besides that, the model eliminated the differences between varieties and species. Nevertheless, the correlation between yield potential classes and grain yield was low but the correlation of classes with nitrogen response was higher. Future studies must be based on nitrogen's response in every class of the model to predict different N rates.

¹ Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (124 p). March, 2008.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1. LINHA DE ESTUDO I.....	20
3.1. LINHA DE ESTUDO II.....	23
3.1. LINHA DE ESTUDO III.....	27
3.1. LINHA DE ESTUDO IV.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1. Modelo para correção dos fatores que interferem no NDVI.....	34
4.1.1. O efeito dos elementos da superfície de fundo.....	35
4.1.1.1. Componentes do resíduo (palha, fração de solo e umidades).....	36
4.1.1.2. Exposição do solo e tipos de resíduo.....	43
4.1.2. O efeito dos elementos do dossel.....	46
4.1.3. O efeito dos elementos meteorológicos.....	60
4.2. Modelo para determinação das classes de potencial produtivo	67
4.3. Validação dos modelos.....	79
4.3.1. Validação do modelo de correção do NDVI.....	79
4.3.2. Validação do modelo para determinação do potencial produtivo.....	82
5. CONCLUSÕES.....	99
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
7. APÊNDICES.....	108

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Características químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, RS e lavoura de trigo em Victor Graeff, RS.....	21
2. Características agronômicas das cultivares utilizadas na LINHA DE ESTUDO III. EEA/UFRGS, RS, 2006.....	31
3. Modelo para correção do NDVI em função dos fatores da superfície de fundo.....	46
4. Modelo para correção do NDVI em função dos elementos que interferem nas leituras de NDVI.....	67
5. Valor máximo e mínimo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e biomassa acumulada na parte aérea (valores críticos), obtidos a partir das regressões apresentadas nas Figuras 19 e 20, nas cinco cultivares, nos resíduos de milho e soja. EEA/ UFRGS, RS, 2006.....	73
6. Frequência de ocorrência das classes de potencial produtivo e média absoluta e relativa dentro de cada classe de potencial das variáveis Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), biomassa acumulada da parte aérea relativa, rendimento de grãos relativo, nas quatro classes de potencial produtivo determinadas na área da lavoura. Victor Graeff, RS, 2006.....	84
7. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas das variáveis Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), biomassa relativa, rendimento de grãos relativo e diferença relativa, determinadas na área da lavoura. Victor Graeff, RS, 2006.....	91

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Pontos de amostragem georreferenciados (grade amostral) para medições do NDVI e coleta de plantas. Victor Graeff, RS, 2006.....	32
2. Altimetria (m) do relevo ao longo da área de amostragem. Victor Graeff, RS, 2006.....	33
3. Correlação entre a quantidade de palha (QP) com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	37
4. Correlação entre a umidade da palha e a umidade da fração de solo agregada à palha (US) com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	38
5. Correlação entre a quantidade de palha (QP) com a umidade da “fração de solo agregada à palha” (US), em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	40
6. Correlação entre a quantidade de palha com “fração de solo agregada à palha”, em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	42
7. Valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) dos dados obtidos nas seis amostragens, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	45
8. Produção de colmos por m ⁻² , na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	48
9. Temperatura média do ar, precipitação pluvial acumulada em 15 dias e radiação solar global acumulada em 15 dias, no período entre a semeadura e a colheita de grãos. EEA/UFRGS, RS, 2006.....	49

10. Temperatura média do ar, precipitação pluvial acumulada em 15 dias e radiação solar global acumulada em 15 dias, no período entre a semeadura e a colheita de grãos. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	50
11. Concentração de N no tecido foliar, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	52
12. Biomassa acumulada na parte aérea, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	54
13. Nitrogênio acumulado na parte aérea, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	56
14. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	57
15. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com as variáveis de planta por ocasião da emissão da sexta folha: número de colmos por m ⁻² , biomassa acumulada na parte aérea, concentração de N na parte aérea e N acumulado na parte aérea, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	58
16. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), na emissão da sexta folha, em função da aplicação de água e formação de sobre sobre o dossel, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2007.....	61
17. Flutuação diária do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo e cevada. EEA / UFRGS, RS, 14/08/2007.....	63
18. Temperatura média do ar, umidade relativa do ar e radiação solar global, entre 07:00 e 17:00 horas, no dia 14 de agosto. EEA/UFRGS, RS, 2007.....	64

19. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a biomassa acumulada da parte aérea, nas cinco cultivares de trigo e cevada, nos resíduos de milho. EEA/UFRGS, RS, 2006.....	69
20. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a biomassa acumulada da parte aérea, nas cinco cultivares de trigo e cevada, nos resíduos de soja. EEA/UFRGS, RS, 2006.....	70
21. Modelo teórico para determinação dos valores críticos de NDVI e biomassa acumulada na parte aérea e das classes de potencial produtivo.....	72
22. Regressão polinomial ajustada sobre os valores críticos das cinco cultivares testadas (FIGURA 22.1) para cada resíduo e comparação entre as equações geradas através do intervalo de confiança à 95% de certeza (FIGURA 22.2). EEA/UFRGS, RS, 2006.....	76
23. Modelo para determinação do potencial produtivo de trigo e cevada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), nos resíduos de milho e soja, por ocasião da emissão da sexta folha. EEA/UFRGS, RS, 2006.....	78
24. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) corrigido em função dos elementos da superfície de fundo, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.....	80
25. Ajuste dos valores de biomassa de trigo amostrados na área da lavoura (Victor Graeff, RS, 2006) sobre o modelo de determinação do potencial produtivo de trigo e cevada sob resíduo de soja (EEA/UFRGS, RS, 2006).....	88
26. Mapas de isolinhas, obtidos através do método de krigagem ordinária pontual, da biomassa acumulada na parte aérea e do potencial produtivo baseado no NDVI, classificado conforme três modelos.....	93
27. Mapas de isolinhas obtidos através do método de krigagem ordinária pontual, do rendimento de grãos (segundo dois critérios de classificação de valores) e da diferença relativa entre a biomassa relativa e o rendimento relativo de grãos.....	95
28. Mapa e percentual de sobreposição entre os mapas de isolinhas do potencial produtivo superestimado com a biomassa acumulada na parte aérea relativa, rendimento relativo de grãos e diferença relativa entre a biomassa relativa e o rendimento relativo de grãos.....	94

1. INTRODUÇÃO

O potencial produtivo das culturas é uma das formas para expressar a condição nutricional da planta, em um determinado momento, e pode ser aplicado nos cereais de inverno, por ocasião da emissão da sexta folha, com fins de indicar, a possível resposta das plantas a diversos fatores ambientais e, dentre estes, o nitrogênio disponível no solo.

A planta responde de maneira diferente ao N aplicado, segundo as condições ambientais do ano e do local de cultivo. Porém, estes dois fatores são de difícil quantificação (incontroláveis), pois interagem com os elementos específicos de cada lavoura (pragas, doenças, etc...). Por esta razão, as metodologias mais eficientes na predição da condição nitrogenada das culturas, são as variáveis fisiológicas ou morfológicas, intimamente relacionadas ao seu potencial produtivo (controláveis). Essas metodologias, no entanto, são pouco divulgadas no meio agrônomo ficando restritas ao âmbito de trabalhos de pesquisa, pois sua aplicação exige mão-de-obra e tempo para obtenção dos resultados.

O manejo nitrogenado de trigo e cevada no Rio Grande do Sul, baseia-se na análise da matéria orgânica do solo e isto é suficiente para manter a produtividade à patamares razoáveis. Porém, este método não é adequado quando se busca a máxima eficiência do uso do nitrogênio (N), pois ele leva a freqüentes perdas de N por sub ou superfertilizações ao longo dos anos.

O método baseado nas variáveis de planta, para ser eficiente deve ser: rápido, não-destrutivo e avaliado em tempo-real. As técnicas de sensoriamento remoto adequaram-se a estas exigências e os instrumentos são baseados em características ópticas das plantas, como a reflectância, sendo o GreenSeeker um dos modelos entre os sensores terrestres portáteis. Este sensor, utilizado no presente trabalho, baseia-se no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e é empregado para caracterizar diversos estresses nas plantas, incluindo a deficiência de N.

O advento destes instrumentos inicia uma nova fase dentro do contexto das técnicas da agricultura de precisão no Brasil. A adubação nitrogenada, em taxa variável, é uma técnica refinada associada a estudos de variabilidade espacial, que no Brasil, de maneira geral, são utilizados para relacionar o rendimento de grãos com algum(ns) atributo(s) químico(s) e/ou físico(s) de solo. Porém, em diversos países, as propriedades emergentes do solo e as características ópticas das plantas, passaram a ser priorizadas nos atuais trabalhos de agricultura de precisão.

O primeiro passo, na geração de uma metodologia de quantificação de doses nitrogenadas a serem aplicadas em taxa variável, uma opção é a construção de modelos que caracterizem os diferentes potenciais produtivos de lavouras. O estudo de características ópticas das plantas é uma das ferramentas disponíveis que pode ser aplicada nesta modelagem. Esta ainda é uma técnica incipiente no Brasil, porém este trabalho visa integrar as áreas do sensoriamento remoto, fisiologia de plantas e geoestatística, para a geração de um método para estimativa do potencial produtivo em culturas de inverno que possa ser aplicados no futuro como ferramenta inicial do manejo do N.

Com base nestas considerações, o presente trabalho teve o seguinte objetivo geral:

Desenvolver e validar um modelo para determinar classes de potencial produtivo a partir de leituras de NDVI relacionadas a uma variável de planta e caracterizar fatores que interferem na leitura.

Como objetivos específicos do trabalho buscou-se:

- construir e validar um modelo de correção do NDVI, a fim de isolar os principais fatores que interferem nos valores deste índice no dossel;

- determinar qual variável de planta é mais associada aos valores de NDVI e é indicadora do potencial produtivo na emissão da sexta folha do colmo principal;

- construir e validar, em condição de lavoura, um modelo baseado no NDVI, para determinação de classes do potencial produtivo em trigo e cevada;

- relacionar a variabilidade espacial das classes de potencial produtivo determinadas na emissão da sexta folha de trigo e cevada, com a variabilidade espacial do rendimento de grãos e da resposta das culturas ao potencial produtivo definido neste momento.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O **potencial produtivo** é definido como a máxima capacidade de produção de uma planta ou comunidade de plantas em função da limitação imposta pelo ambiente no qual ela se encontra (Evans & Fischer, 1999). Em uma cultura, este potencial pode ser relacionado a qualquer variável agrônômica (de solo ou planta) para qualquer momento do ciclo de desenvolvimento (Girma *et al.*, 2006). Também, pode ser diretamente associado ao rendimento de grãos (Araújo *et al.*, 2005; Raun *et al.*, 2005) e o tipo de resposta das plantas ao nitrogênio aplicado (Raun & Johnson, 1999) e a outros fatores de ambiente que podem modificar esta resposta (pragas, doenças, condições meteorológicas...). Nos cereais de inverno, grande parte da otimização deste potencial é determinada pela dose e época de aplicação do N, de acordo com condições específicas de cada lavoura (Mundstock, 1999).

A emissão da sexta folha do colmo principal foi definida em trigo (Bredemeier & Mundstock, 2001) e em cevada (Wamser, 2002) como **época crítica para aplicação do N**, pois é quando a planta apresenta a máxima exigência por nitrogênio, uma vez que se define o número máximo de filhos emitidos pela planta (Mundstock, 1999). Desta forma, o potencial produtivo, neste momento, é uma referência ao componente de rendimento espigas por área (Wobeto, 1994). Em momentos posteriores à emissão da sexta folha, ao longo do

crescimento da cultura, os demais componentes passam a serem definidos, em diferente intensidade, sob o efeito do ambiente.

Atualmente, as **doses de N recomendadas para trigo e cevada**, no Rio Grande do Sul, são baseadas no teor de matéria orgânica do solo e o tipo de resíduo vegetal da cultura antecessora (resteva). A aplicação de N é parcelada em duas épocas: a 1ª por ocasião da semeadura e a 2ª (cobertura) entre 30 e 45 dias após (Comissão, 2004). Este método não é preciso para quantificar, por ocasião da emissão da sexta folha, a disponibilidade real do N mineral pelo solo e a demanda nutricional da planta (Poletto, 2004). Assim, foram testadas algumas **variáveis alternativas de planta e solo**, objetivando diagnosticar, com maior precisão, a relação entre o estado nutricional das plantas e as doses de N aplicadas.

Estas variáveis foram analisadas ao longo de anos, no Rio Grande do Sul, em diversos trabalhos de predição de doses nitrogenadas para cereais de inverno (Wobeto, 1994; Bredemeier, 1999; Wamser, 2002; Polleto, 2004). Dentre elas as principais foram: a concentração de nitrogênio no tecido foliar, a biomassa acumulada na parte aérea, o padrão de afilhamento, o potencial de mineralização do N pelo solo e os teores de NH_4^+ e NO_3^- no solo. Os resultados obtidos indicam a existência de variabilidade entre anos, estações de crescimento, locais e tipos de restevas. Essas metodologias são pouco claras na definição de **classes do potencial produtivo**, pois a relação entre a condição nutricional das plantas neste momento com o rendimento de grãos é variável (Bredemeier, 1999; Wamser, 2002; Polleto, 2004). Portanto, determinar classes que possam estabelecer relações da resposta do rendimento de grãos ao N aplicado é o primeiro passo para criação de uma nova abordagem do manejo nitrogenado baseado no potencial produtivo.

Além disso, estas metodologias são consideradas destrutivas e exigentes de mão-de-obra para amostragens a campo e demandam tempo para análise dos resultados, o que as tornam inaptas para aplicação em lavouras comerciais (Molin, 2001). Para contornar esta limitação, surgem novas tecnologias, como as baseadas em ferramentas de sensoriamento remoto que permitem o desenvolvimento de metodologias mais dinâmicas para os processos de adubação nitrogenada (De Boer, 2004).

O **sensoriamento remoto** é a técnica de aquisição de informações sobre um objeto localizado sobre a superfície da terra sem que haja contato físico (Meneses, 2001). Uma dos instrumentos utilizados dentre as técnicas de sensoriamento remoto se baseia na análise da reflectância (ρ), definida como a capacidade de um corpo em refletir a energia radiante, ou seja, a razão entre a quantidade de radiação refletida e a radiação incidente (Meneses, 2001). A reflectância é utilizada no estudo do comportamento espectral de alvos, que é descrito como as características intrínsecas dos objetos que afetam sua capacidade em refletir a radiação eletromagnética incidente (Figueiredo, 2005). A radiação eletromagnética incidente corresponde ao espectro luminoso determinado pela energia solar, a qual chega à superfície da terra. Em sensoriamento remoto, são estudadas porções específicas deste espectro: visível (400-700 nm), infravermelho próximo (700-1300 nm) e infravermelho emissivo (8,0-14,0 μm) (Figueiredo, 2005). A intensidade da reflectância da radiação incidente pelos alvos é dependente das suas propriedades físico-químicas.

A reflectância dos alvos na superfície terrestre é constituída, basicamente, pela interação entre solo, água e vegetação (dossel) (Figueiredo, 2005). Na vegetação, as chamadas propriedades ópticas das folhas, tais como

transmitância, reflectância e fluorescência, são formas de determinar o estado nutricional de uma cultura de forma indireta (Jacquemoud & Ustin, 2001).

O status nitrogenado, em plantas, pode ser indicado pela modificação da reflectância do dossel (Serrano *et al.*, 2000), basicamente por haver uma relação direta entre reflectância e teor de clorofila (Daughtry *et al.*, 2000). O aumento da concentração de clorofila nos tecidos foliares se dá em função dos níveis de N, resultando em incremento de área foliar e conseqüentemente atividade fotossintética (Serrano *et al.*, 2000).

As faixas do espectro luminoso do vermelho e do infravermelho próximo são os maiores indicativos de estresses nutricionais em plantas (Gates *et al.* 1965; Knipling, 1970). No comprimento de onda do vermelho (680-700 nm) ocorre forte correlação entre a reflectância e a concentração de clorofila (Gitelson *et al.*, 1996). Nesta faixa, têm-se o pico da máxima absorção da radiação fotossinteticamente ativa, diminuindo a reflectância, com o aumento de concentração de clorofilas a, b e carotenóides no tecido foliar (Carter & Knappa, 2001). O comprimento de onda do infravermelho próximo (700 à 1300 nm) é um indicativo indireto do acúmulo de biomassa e estágio de desenvolvimento das culturas (Peñuelas & Filella, 1998). A radiação, neste comprimento de onda, é pouco absorvida pela planta e a reflectância é determinada pelas características das estruturas internas das folhas. Plantas jovens, com menor quantidade de espaços intercelulares expostos ao ar e plantas com baixo espessamento de cutícula, apresentam baixos índices de refração da radiação no mesófilo e, portanto, menor reflectância (Slaton *et al.*, 2001).

Em diversas espécies, os comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo, apresentam uma zona de transição chamada de “ponto de inflexão vermelho-vermelho extremo” com alta sensibilidade à

modificação da clorofila (Horler, 1983; Yoder & Crosby, 1995). Nesta, ocorre a máxima absorção da radiação no comprimento de onda do vermelho e máxima reflexão no comprimento de onda do infravermelho próximo (Horler *et al.*, 1983). Em trigo, o este ponto ocorre no ponto de inflexão dos comprimentos de onda de 703 a 735 nm (Boochs *et al.*, 1990).

Com base nos princípios do comportamento espectral da vegetação, desenvolveram-se sensores remotos adaptados para **adubação nitrogenada em taxa variável** em lavouras (De Boer, 2004). A vantagem na aplicação destes instrumentos é a rapidez na obtenção dos dados à campo, sem destruição das amostras, em tempo real e com o uso otimizado dos insumos (Stafford, 2000).

Os sensores remotos podem ser classificados segundo sua plataforma de aquisição de dados como: orbital, aéreo e terrestre (Figueiredo, 2005). Apesar destes sensores se diferenciarem quanto aos princípios tecnológicos utilizados, o processo de obtenção dos dados é similar e dá-se a partir da quantificação da reflectância do dossel.

Nos sensores remotos terrestres, os radiômetros portáteis de campo e os sensores ativos de emissão de fótons em comprimentos de onda específicos, são freqüentemente aplicados na caracterização do comportamento espectral das culturas (Stafford, 2000; Molin, 2001). Existem diversos modelos de sensores remotos ativos, já disponíveis no mercado, para fins exclusivos de aplicações nitrogenadas em lavouras (De Boer, 2004).

O GreenSeeker é um destes sensores, desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA), ao longo da década de 90 e licenciado pela NTech industries (Ukiah, CA, EUA) em 2001. Este aparelho utiliza diodos de emissão de radiação para gerar comprimentos de onda vermelho (650 nm) e infravermelha próximo (770 nm). Esta radiação é refletida pela cultura e medida por um fotodiodo

localizado na frente do equipamento. A leitura de reflectância, pelo sensor, é calculada por um microprocessador interno, fornecendo o NDVI que é transmitido a um computador portátil, adaptado ao sensor (NTech industries, 2008).

O **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)** foi proposto por Rouse *et al.* (1973) para fins de quantificação do crescimento da vegetação. Este índice é dado por: $NDVI = (\rho_{nir} - \rho_r) / (\rho_{nir} + \rho_r)$, onde ρ_{nir} e ρ_r são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, respectivamente. O NDVI varia de -1 a +1. Os valores negativos representam as nuvens, ao redor de zero representam solo nú ou sem vegetação e os valores maiores que zero representam a vegetação. Quanto maior o valor do NDVI, maior o vigor de crescimento da cultura (Liu, 2006).

O NDVI é utilizado como indicador de potencial produtivo em trabalhos referentes a previsão de safras por sensoriamento remoto. O NDVI obtido por ocasião do momento de máximo acúmulo de biomassa das culturas (em geral no florescimento) é diretamente relacionado ao rendimento de grãos (Liu, 2006). No manejo nitrogenado o princípio é semelhante. Porém, o NDVI é também relacionado a modificação das doses de N (Serrano *et al.*, 2000). Ele aumenta proporcionalmente conforme as doses, devido a maior reflexão no comprimento de onda do infravermelho próximo e maior absorção no vermelho.

O uso do NDVI, como indicador do status nitrogenado, é precedido pela análise da sua relação com as variáveis tradicionais, usualmente utilizadas para quantificação da condição nutricional de plantas (Raun *et al.*, 2005). Como estas apresentam diferente resposta frente às doses de N aplicadas, ao longo de anos, locais e tipos de resíduos (Bredemeier, 1999; Polleto, 2000) a relação do NDVI com elas também é afetada, tornando-se instável.

Dentre estas variáveis, a associação da concentração do nitrogênio no tecido foliar (N foliar) com o NDVI é considerada baixa (Casa & Castrignanò, 2007). Este resultado corrobora com Yoder & Crosby (1995), que encontraram baixa associação do N foliar com o teor de clorofila, sob condições não-limitantes de N. Os autores justificam que o incremento de N adquirido nesta situação é convertido em fotoassimilados, não modificando de forma significativa o percentual de N no tecido foliar. Já o índice de área foliar (IAF) (Price & Bausch, 1995; Aparicio *et al.*, 2002) e a biomassa acumulada na parte aérea (Bellairs *et al.*, 1996; Moges *et al.*, 2004) são considerados os indicadores mais fortemente correlacionados ao NDVI em cereais de inverno. A limitação da relação do NDVI, com estas duas variáveis, é determinada principalmente pelas características anatômicas e morfológicas das plantas, como arquitetura foliar, estatura de planta, inserção foliar e comprimento da lâmina foliar (Jackson & Pinter Jr, 1986). Estes autores verificaram que dosséis de trigo mais erectófilos tendem a ter reflectância menor do que dosséis planófilos, pois estes não permitem maior interação dossel-fundo. Além disso, foram identificadas, em genótipos de trigo, diferentes eficiências do uso da radiação, decorrente de atributos agronômicos específicos à cada cultivar (Moreira *et al.*, 2005).

A variável de planta, que apresentar adequada capacidade de se relacionar com o NDVI, será a base para o uso como indicador de potencial produtivo na emissão da sexta folha. Neste princípio, Raun *et al.* (2005), desenvolveram um **modelo para predição de doses de N pelo NDVI** com o sensor GreenSeeker, que pode ser resumido nas seguintes etapas:

1^a) avaliação da eficiência do NDVI como indicador de status nitrogenado da planta;

2ª) relação entre o NDVI com o rendimento de grãos por meio do ajuste de função matemática;

3ª) avaliação do efeito de doses nitrogenadas sobre a modificação desta função;

4ª) criação de algoritmo matemático para predição das doses nitrogenadas.

Os primeiros trabalhos sobre estas etapas, conduzidos por Stone *et al.* (1996), determinaram a relação do NDVI a soma térmica na época da leitura do sensor, e esta relação foi relacionado com o rendimento de grãos. Este artifício controlou um dos erros comuns nos modelos de predição do rendimento de grãos por meio do potencial produtivo, que a baixa correlação direta do rendimento de grãos com o NDVI (Raun & Jonhson, 1999; Grima *et al.*, 2006). O outro fator decisivo na eficiência destes modelos é determinado pela metodologia de aquisição dos dados. É necessário a geração de número suficiente de pontos amostrais que permita a criação de uma curva-resposta entre o índice espectral e o parâmetro biofísico de interesse (Liu, 2006). Desta forma, para a validação do algoritmo de recomendação de doses de N, por meio do sensor GreenSeeker, Raun *et al.* (2005) conduziram 30 ensaios, ao longo de seis anos, para gerar a variabilidade necessária.

Outro exemplo, na aplicação destes princípios, foi o modelo de predição de potencial de afilhamento em trigo, criado com base no NDVI, a partir de dados obtidos em 22 ensaios conduzidos em lavouras ao longo de dois anos (Phillips *et al.*, 2004). Também o modelo de estimativa do N acumulado em trigo, desenvolvido por Serrano *et al.* (2000), correlacionou o NDVI com doses de N, utilizando espectroradiometria de campo. Nestes trabalhos, confirma-se que a simples medição do NDVI sobre o dossel da vegetação, não propicia resultados concretos que possam ser utilizados de maneira racional. É, portanto, necessário

o entendimento dos fatores que modificam a relação entre o NDVI e o potencial produtivo.

O NDVI foi um índice derivado para expressar apenas as condições de desenvolvimento pleno da vegetação. Quando a vegetação ocupa toda a superfície do solo com seu dossel, o NDVI é eficiente em aferir diversas situações de estresses das culturas (Price & Bausch, 1995; Stone *et al.*, 1996). Porém, quando ocorrem situações de dossel incompleto (comum em cereais de inverno por ocasião da emissão da sexta folha), os elementos que compõem a superfície do solo também passam a influenciar nas leituras de NDVI (Epiphanyo & Formaggio, 1991). A este conjunto de elementos Huete (1985) chamou de “**superfície de fundo**”.

No comportamento espectral do solo, os elementos que mais exercem influência sobre a modificação do NDVI foram resumidos por Dalmolin *et al.* (2005) em: matéria orgânica, textura, capacidade de troca de cátions (CTC), composição mineralógica, rugosidade e umidade. Estas características modificam a reflectância de tal forma, que determinam a necessidade de criação de índices específicos para correção do NDVI, objetivando predizer a condição do dossel com mínima interferência da superfície de fundo (Huete, 1985; Gao *et al.*, 2000).

Além dos atributos do solo descritos acima, outros elementos intrínsecos a superfície de fundo, também são determinantes na modificação do NDVI, (especialmente sob condições de baixo dossel de plantas) tais como: quantidade, umidade e o tipo de resíduo vegetal presente sobre a superfície do solo ou agregado a ele (Sullivan *et al.*, 2004). O comportamento espectral, do resíduo vegetal, é precedido pela avaliação da reflectância da matéria orgânica ao longo do seu processo de decomposição. Esta sofre mudanças na região do

visível e do infravermelho próximo quando modifica-se a relação C/N dos fragmentos vegetais que compunham a matéria orgânica (MO) lábil do solo (Dalmolin *et al.*, 2005). Os resíduos sobre o solo, constituídos por material vegetal fragmentado, apresentam menores valores de NDVI que materiais vegetais com maior área superficial (Nagler *et al.*, 2000; Sullivan *et al.*, 2004). A distribuição do resíduo vegetal e sua capacidade de retenção de água, também modificam a reflectância da radiação incidente. Com quantidades crescentes de palha de trigo sobre o solo, há maior reflectância quando a palha cobre 80% da superfície do solo (Sullivan *et al.*, 2004). Porém, Daughtry *et al.* (2004), verificaram, em resíduos de soja e milho sob três tipos de solo, que a reflectância diminuiu a medida que a umidade dos resíduos aumentou.

O efeito dos elementos da superfície de fundo, descritos acima, tem levado ao estudo de métodos para adequação dos índices de vegetação. Jiang *et al.* (2006) determinaram uma variante do NDVI para quantificação do teor de clorofila, corrigido de acordo com o percentual de cobertura vegetal em superfícies de fundo heterogêneas. Assim como Casa & Castrignanò (2007) desenvolveram um modelo multivariado para relacionar o NDVI com os estádios de desenvolvimento das plantas em diferentes tipos de solo.

Outro aspecto relacionado a modificação do NDVI que pode acarretar interpretações errôneas de seu valor, são as **características dos detectores e as influências atmosféricas** (Menses, 2001). As imagens, na forma em que são recebidas originalmente dos sensores remotos, apresentam degradações radiométricas devidas a: desajustes na calibração dos detectores, erros esporádicos na transmissão dos dados, influências atmosféricas e distorções geométricas. Todas estas imperfeições, se não corrigidas (pré-processamento), podem comprometer os resultados e produtos derivados das imagens

(Figueiredo, 2005). O NDVI foi um índice criado com o objetivo de minimizar, os efeitos atmosféricos, por meio de sua normalização (Rouse *et al.*, 1973). Parte-se deste pressuposto na tecnologia de desenvolvimento do sensor GreenSeeker, pois não há referências sobre a necessidade de pré-processamento dos dados obtidos com a aplicação do sensor à campo. Justifica-se esta posição devido ao seu sistema de construção. Por ser ativo, o sensor emite uma quantidade de feixes luminosos sobre o dossel a uma taxa de 10 GHz. Nesta frequência, a quantidade de radiação emitida e refletida pelo alvo, praticamente não sofre interferência das condições atmosféricas (Inman *et al.*, 2005). Porém, dados referentes a utilização deste sensor sob diferentes situações de ambiente não são referenciados na literatura, o que remete a dúvidas quanto o real isolamento das leituras do sensor frente à modificação de elementos meteorológicos.

Na tradicional espectroradiometria de campo já é amplamente conhecido o efeito dos **elementos meteorológicos** que agem sobre a leitura dos sensores, tais como: radiação incidente, luminosidade, precipitação e temperatura. Desta forma, o uso destes sensores muitas vezes é limitado a situações ótimas de condições meteorológicas (Meneses, 2001).

Alguns exemplos demonstram o efeito dos elementos meteorológicos sobre a reflectância do dossel de maneira direta ou indireta. Jackson *et al.* (1983) encontraram diferenças entre valores de reflectância, em dossel de trigo, a partir de leituras realizadas em condições atmosféricas com e sem presença de nebulosidade. Segundo os autores para condições atmosféricas com elevada nebulosidade os valores de reflectância de alvos na superfície apresentaram queda nos valores reflectância. Também em trigo, tem sido constatado que o ângulo de elevação solar modifica as leituras de reflectância

(Jackson *et al.*, 1979). A medida que aumentou-se este ângulo os valores de reflectância das plantas diminuíram. Em dossel de milho, a flutuação diária do NDVI, a partir de dados obtidos a campo, mostrou valores superiores nas primeiras horas da manhã e nas linhas de semeadura no sentido norte – sul (Souza *et al.*, 2004). Também Ceccato (2001), verificou que plantas sob situações em que os espaços intercelulares ficam saturados com água, apresentam redução da reflectância, devido ao aumento da absorção da radiação pelas moléculas de água.

Outro elemento que também modifica intensamente o NDVI é a uniformidade dos elementos da superfície de fundo nas áreas de lavoura. Ao longo de uma lavoura sob sistema de plantio direto, elementos como a quantidade de palha sobre a superfície do solo ou a umidade do solo podem variar espacialmente em sentido e direção conforme características do relevo. Esta desuniformidade espacial das características da superfície do fundo pode modificar o NDVI obtido sobre uma comunidade de plantas (Basso *et al.*, 2001).

A **variabilidade espacial de atributos agrônômicos** é uma das linhas de estudo da agricultura de precisão (Molin, 1997). A geoestatística é a ferramenta mais utilizada para análise dos dados de variabilidade espacial e trata da avaliação da dependência espacial de variáveis regionalizadas. Esta dependência está presente em todas as direções e fica mais fraca à medida que aumenta a dispersão na localização dos dados (Camargo *et al.*, 2004).

Um dos métodos da geoestatística para quantificação da dependência espacial, comuns em análises agrônômicas, é a interpolação de dados amostrados pela krigagem pontual (Vicente, 2004). Este método consiste em uma seqüência de etapas e foi resumido por Camargo *et al.* (2004):

- 1) Análise exploratória de dados;
- 2) Análise estrutural (modelagem da correlação espacial);
- 3) Interpolação estatística.

Os trabalhos referentes a análise da variabilidade espacial, utilizando estes critérios, são largamente empregados na agronomia. No Brasil, atualmente, a variabilidade espacial de atributos de solo, visando a construção de zonas de manejo para adubação é uma técnica com cada vez maior difusão no meio agrícola (Molin, 2001). Porém, a correlação entre os mapas gerados pelo levantamento de análises do solo, freqüentemente, não são indicativos eficientes do rendimento de grãos (Silva & Alexandre, 2005) ou do potencial produtivo ao longo do ciclo das culturas (Girma *et al.*, 2006). Além disso, o trabalho de campo referente ao levantamento amostral é oneroso, necessitando grande número de amostras e sub-amostras para aquisição de resultados confiáveis (Molin, 2001).

As técnicas baseadas no uso de sensores remotos, por outro lado, mostram-se cada vez mais promissoras e difundidas em diversos países (De Boer, 2004). Raun *et al.* (2002), na cultura de trigo, geraram mapas para adubação em taxa variável a partir do algoritmo baseado no NDVI desenvolvido por eles. Porém, apesar das aplicações localizadas aumentarem a eficiência do uso do N pelas plantas, não houve correlação significativa entre a distribuição espacial do rendimento de grãos com as doses de N aplicadas em taxa variável (Jorgensen & Jorgensen, 2007). Da mesma forma, também é controversa a relação entre a variabilidade espacial do potencial produtivo com a do rendimento de grãos (Raun & Johnson, 1999). Após a quantificação do potencial produtivo, o efeito dos fatores bióticos e abióticos sobre as plantas (como doenças, pragas e condições meteorológicas) é variável em uma área de lavoura (Machado, 2002).

Desta forma têm-se, ao longo dos anos, a flutuação das zonas de variabilidade espacial do rendimento de grãos (Milani *et al.*, 2006) e do potencial produtivo.

Atualmente, modelos multicompartimentalizados que consideram fatores modificadores do potencial produtivo após sua determinação, estão sendo aplicados no manejo nitrogenado. Por exemplo, doses de N em trigo foram adequadas de acordo com a condutividade elétrica do solo (estimador indireto da MO) e, em função da intensidade de precipitação pluvial após a aplicação do N (Wong & Asseng, 2006). Da mesma forma, a soma térmica acumulada entre a semeadura e a época de aplicação do N, foi relacionada com medições de NDVI no período, melhorando a relação do potencial produtivo estimado com o rendimento de grãos (Raun *et al.*, 2001).

Os novos modelos, baseados na reflectância, enfatizam o princípio de que não se justifica a aplicação direta de novas tecnologias em agricultura de precisão, pois deve ser precedida pelo entendimento dos processos biológicos que, muitas vezes, não são facilmente explicados matematicamente (Pires *et al.*, 2004). Desta forma, o modelo para determinação do potencial produtivo é eficiente se houver alta relação entre reflectância do dossel e a variável indicadora de status nitrogenado, tendo mínima interferência de outros fatores e permitindo o ajuste de doses nitrogenadas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos de campo foram conduzidos nos anos de 2006 e 2007 na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul, RS, e em uma lavoura comercial de trigo, em Victor Graeff, RS. Os trabalhos laboratoriais foram realizados no Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, em Porto Alegre (RS).

A EEA/UFRGS situa-se na Depressão Central do Rio Grande do Sul em uma altitude média de 46 m acima do nível do mar. O solo da área experimental pertence a unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como um Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2002).

A lavoura de trigo está situada no Planalto Médio do RS, numa altitude média de 411 m acima do nível do mar e o solo pertence a unidade de mapeamento Passo Fundo, caracterizado como um Latossolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2002).

O clima, nos dois locais, é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa conforme a classificação de Köppen (Ipagro, 1979). A precipitação pluvial média anual, em Eldorado do Sul, é de 1440 mm e a temperatura média mensal varia entre 14 e 25°C, entre os meses mais frios e mais quentes (Bergamaschi, 2003). Em Victor Graeff, a precipitação pluvial média anual é de 1650 mm e a

temperatura média mensal varia entre 12 e 25 °C, entre os meses mais frios e mais quentes (Ipagro, 1979).

Os dados meteorológicos dos anos de 2006 e 2007 para a EEA/UFRGS foram obtidos da base física do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, distante cerca de 3 km da área experimental (Bergamaschi, 2007). Os dados referentes a Victor Graeff foram obtidos na estação meteorológica de Passo Fundo, sob controle do Instituto Nacional de Meteorologia (Agritempo, 2008) (Apêndice 1), situada à aproximadamente 48 km da área da lavoura estudada. Os dados coletados foram: temperatura média do ar (°C), radiação solar global ($\text{cal cm}^2 \text{ dia}^{-1}$) e precipitação pluvial (mm) durante a estação de crescimento da cultura .

Antes da instalação dos experimentos na EEA/UFRGS e da lavoura em Victor Graeff, foram retiradas amostras de solo nas áreas de estudo, na camada entre as profundidades de 0-20 cm. Elas foram analisadas pelo Laboratório de Análises de Solo da UFRGS e os resultados estão descritos na Tabela 1.

Os experimentos foram delineados tomando-se como base as seguintes linhas de estudo:

LINHA DE ESTUDO I. Análise dos principais elementos, da superfície de fundo, que poderiam interferir nas leituras de NDVI;

LINHA DE ESTUDO II. Análise da associação entre variáveis de planta e as leituras de NDVI, sob diferentes condições de superfície de fundo e simulação de alguns elementos meteorológicos que poderiam interferir nas leituras de NDVI;

LINHA DE ESTUDO III. Geração de variabilidade, para desenvolvimento do modelo para determinação do potencial produtivo;

LINHA DE ESTUDO IV. Validação do modelo gerado em condições de lavoura comercial e sua relação com a variabilidade espacial do rendimento de grãos e sua resposta ao N aplicado.

Os estudos I, II e III foram executados na EEA/UFRGS e o IV estudo na lavoura de trigo em Victor Graeff.

3.1. LINHA DE ESTUDO I

Dois experimentos foram realizados, sendo um deles instalado sobre resíduo de milho (“pós-milho”) e outro sobre resíduo de soja (“pós-soja”). O conceito de “resíduo”, refere-se a soma da “palha” remanescente da cultura anterior (resteva) mais as partículas de solo agregadas a esta. Sobre cada tipo de resíduo criaram-se duas condições de exposição de solo: “com” e “sem exposição do solo”.

O conceito de “solo exposto” refere-se àquela condição em que há a mínima presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo. Esta condição foi obtida mediante a retirada da máxima quantidade possível de resíduos existente sobre a superfície do solo. Estes foram alocados imediatamente à parcela adjacente, correspondendo ao tratamento “sem exposição do solo”. As áreas foram mantidas com ausência total de plantas por meio do controle com herbicida de ação total a base de Glyphosato (3 L ha^{-1} do produto comercial).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados com dois por tratamento. Cada unidade experimental foi constituída por 13 linhas de 5 m de comprimento espaçadas em 0,17 m entre sí, perfazendo $11,05 \text{ m}^2$ de área.

As avaliações foram realizadas durante seis semanas entre os dias 03 de julho e 14 de agosto de 2007 e consistiram dos seguintes procedimentos:

TABELA 1. Características químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, RS e lavoura de trigo em Victor Graeff, RS.

Ano	Município	Cultura antecessora	Argila %	pH (H ₂ O)	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	MO ¹ %	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	V ² %
2006	Eldorado do Sul	Milho	19	5,7	53	183	1,9	0	3,5	1,7	77
2006	Eldorado do Sul	Soja	26	5,8	56	202	2,1	0	4,3	2	64
2006	Victor Graeff	Soja	>60	5,9	20	398	4,1	0	8,1	3,8	80
2007	Eldorado do Sul	Milho	28	5,8	24	189	1,7	0	3,8	1,7	63
2007	Eldorado do Sul	Soja	25	5,7	30	220	1,8	0	3,5	1,6	56

¹ MO = matéria orgânica

² V = saturação de bases

1. **Leitura de NDVI da superfície de fundo.** Realizada com o uso do sensor “GreenSeeker” (Apêndice 2). O aparelho foi posicionado numa altura entre 0,8 e 1,0 m acima e paralelamente à superfície do solo. A leitura foi realizada em 3 m² (5 m de deslocamento linear sobre a unidade experimental X largura útil de 0,6 m captada pelo sensor). Após o acionamento do sensor, ocorre a leitura de um ponto sobre a superfície a cada 0,1 segundo, sendo geradas, nesta área, entre 30 e 40 medições de NDVI.

Posteriormente à leitura, foi realizada a amostragem de resíduos na parcela, com duas sub-amostras de 0,225 m² por parcela. Após a retirada dos resíduos, foi realizada a amostragem de solo na profundidade de 10 cm. Sobre as amostras de resíduos e solo, foram determinadas as seguintes variáveis:

2. **Umidade dos resíduos.** As amostras de resíduos foram pesadas e colocadas em estufa de aeração forçada a 65°C durante 72 horas. Após, foram novamente pesadas, sendo obtida a umidade dos resíduos, expressa em percentagem do seu peso úmido;
3. **Umidade do solo.** As amostras de solo foram pesadas e colocadas em estufa de aeração forçada à 65°C durante 72 horas. Após, foram novamente pesadas, sendo obtida a umidade do solo, expressa em percentagem do seu peso úmido;
4. **Quantidade de palha.** Após a secagem em estufa os resíduos foram lavados, a fim de retirar o máximo de solo agregado nos tecidos vegetais. A palha obtida após este processo foi pesada, tendo-se a quantidade de palha expressa em kg ha⁻¹;
5. **Umidade da palha.** Obtida a partir da diferença entre a umidade dos resíduos e a umidade do solo;

6. **Fração de solo agregada à palha dos resíduos.** Expressa em termos relativos (%) e obtida considerando o peso do resíduo como 100% e o peso da palha como uma proporção deste. A diferença entre estes dois pesos constitui o valor da fração de solo agregado à palha antes da lavagem;
7. **Umidade da fração de solo agregada à palha dos resíduos.** Considerada como a própria umidade do solo amostrado.

O efeito dos tratamentos, sobre as variáveis determinadas, foi obtido mediante análises de correlações, sendo testada sua significância pelo teste-t ao nível de probabilidade de 5%. Os procedimentos da estatística descritiva, nesta linha de estudo e nas demais, foram realizados com a utilização do programa computacional The SAS[®] System for Windows 9.0.

3.2. LINHA DE ESTUDO II

Dois experimentos, com trigo e cevada, foram instalados sobre áreas contendo resíduos de milho e soja, nos anos de 2006 e 2007. Os experimentos em 2007 foram instalados nas mesmas áreas utilizadas em 2006, sob restevas de milho e de soja. No verão 2006/2007, foi feita rotação com as culturas de milho e soja, com a diferença de que, onde foi semeada soja no verão de 2006, semeou-se milho em 2007 e vice-versa.

Por ocasião da pré-semeadura, nos dois anos, foi realizada a eliminação de ervas daninhas da área, com herbicida de ação total a base de Glifosato (3 L ha⁻¹ do produto comercial) e adubação de base, correspondente à aplicação de 350 kg ha⁻¹ da fórmula 0-22-30 (NPK).

A semeadura foi realizada em 09 de junho de 2006 e 21 de junho de 2007, utilizando-se semeadora de 13 linhas. As espécies semeadas, em cada resteva, foram trigo (cultivar ÔNIX) e cevada (cultivar MN 743). As sementes foram

tratadas com fungicida a base de Triadimenol (200 ml / 100 kg de sementes) e inseticida a base de Imidacloprid (100 ml / 100 kg de sementes). A densidade de semeadura, para as cultivares ÔNIX e MN 743, foi de 325 e 300 sementes aptas m⁻², respectivamente.

Os tratamentos foram: “com exposição do solo” e “sem exposição do solo”, gerados da mesma forma que na LINHA DE ESTUDO I. O delineamento experimental foi de parcelas subdivididas, sendo o fator espécie alocado na parcela principal e o fator exposição do solo nas sub-parcelas, em blocos casualizados com quatro repetições. As unidades experimentais corresponderam a parcelas de 5 m de comprimento com 13 linhas espaçadas em 0,17 m, perfazendo 11,05 m² de área.

Na emergência das plantas (16 de junho de 2006 e 01 de julho de 2007) foram aplicados 20 kg ha⁻¹ de N sob a forma de uréia (45% de N) e realizado controle de ervas daninhas em pós-emergência, utilizando-se produto seletivo a base de Metsulfuron-metil (2 L ha⁻¹ do produto comercial). A dose de N aplicada neste momento foi escolhida a fim de permitir às plantas disponibilidade de N suficiente para manter o efeito dos tratamentos aplicados na semeadura até a colheita de grãos, visto não ser objetivo neste trabalho avaliar interações dos tratamentos frente a doses de N na cobertura.

Na emissão da sexta folha do colmo principal (cinco folhas completamente expandidas) das plantas (18 de julho de 2006 e 07 de agosto de 2007), foi efetuada a aplicação do N na dose de 20 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia em todas as parcelas.

As manchas foliares, no período vegetativo da cultura, foram controladas com fungicida a base de Tebuconazole (0,75 L ha⁻¹ do produto comercial). Já no período reprodutivo foi realizada nova aplicação de fungicida a base de

Tebuconazole mais Trifloxzistrobin ($0,75 \text{ L ha}^{-1}$ do produto comercial), para controle da ferrugem da folha e manchas foliares, sendo realizada uma segunda aplicação 15 dias após, com este mesmo produto. O controle de lagartas e percevejos foi realizado após o espigamento da cultura, com o uso de inseticida a base de Dimetoato ($0,7 \text{ L ha}^{-1}$ do produto comercial).

As avaliações realizadas, por ocasião da emissão da sexta folha, foram as seguintes:

1. **Leitura de NDVI do dossel:** Realizada seguindo o mesmo procedimento da LINHA DE ESTUDO I, porém a área mediada pelo sensor foi de $0,3 \text{ m}^2$ ($0,5 \text{ m}$ de deslocamento linear sobre a unidade experimental x largura útil captada pelo sensor de $0,6 \text{ m}$ (correspondente a quatro linhas da unidade experimental)).

Após a medição da reflectância, foi realizada a amostragem de plantas na mesma área medida pelo sensor. Nestas amostras, as seguintes variáveis de plantas foram determinadas:

2. **Número de colmos m^{-2} .** O número de colmos por área foi obtido, a partir da contagem, em 20 plantas retiradas da amostra.
3. **Biomassa acumulada na parte aérea (kg ha^{-1}).** A biomassa foi determinada, após secagem das plantas, em estufa de aeração forçada, a aproximadamente 65°C , até peso constante.
4. **Concentração de nitrogênio no tecido foliar (%).** A concentração de N foi obtida nas amostras moídas e homogeneizadas e foi determinada pelo método semi-micro-Kjeldahl, conforme descrito por Tedesco *et al.* (1985).
5. **N acumulado na parte aérea (kg ha^{-1}).** O N acumulado foi obtido a partir da associação entre as duas variáveis anteriores. É um indicador da quantidade de nitrogênio acumulado pela comunidade de plantas em certa área.

O rendimento de grãos (em kg ha⁻¹), na umidade de 13%, foi estimado após a colheita de grãos, em uma área de 7,30 m² (descontadas duas linhas laterais nas bordaduras, mais as linhas nos quais a coleta de plantas foi realizada), nos dias 30 de outubro de 2006 e 09 de novembro de 2007. Este resultado é apresentado no Apêndice 3.

Os resultados das avaliações realizadas por ocasião da emissão da sexta folha, foram submetidos a análise de variância, com os resíduos inseridos no modelo estatístico como locais (com efeito fixo), para avaliar o efeito das resteevas sobre as variáveis entre os dois experimentos. Quando alcançada significância estatística ao nível de probabilidade de 5% foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey.

A correlação entre as variáveis de planta e o NDVI também foi analisada. A associação significativa pelo teste-t, ao nível de probabilidade de 5%, com maior coeficiente de correlação, indicou qual a variável a ser tratada como indicadora do potencial produtivo, para o seu uso na modelagem da LINHA DE ESTUDO III.

No ano de 2007, por ocasião da emissão da sexta folha (14 de agosto), também foram realizados testes referentes à detecção dos prováveis elementos meteorológicos que podem modificar as leituras de NDVI. Estes foram avaliados a partir de simulações de situações comuns que ocorrem no momento da utilização do sensor em lavouras, tais como: a ocorrência de sombra ou molhamento sobre o dossel e a modificação do ângulo de elevação solar.

1. **A ocorrência de sombra e o molhamento** foram avaliados a partir de três tratamentos, aplicados sobre cada unidade experimental. 1º) tratamento “sem anteparo e sem aplicação de água”, correspondeu às condições ambientais no momento da leitura, sem nenhum tipo de interferência sobre a avaliação. 2º) tratamento “com anteparo e sem aplicação de água”, sendo utilizado um

anteparo (lona preta) para formação de sombra sobre a unidade experimental. 3º) tratamento “sem anteparo e com aplicação de água”, correspondeu a pulverização de água (na vazão de 200 L ha⁻¹) sobre a unidade experimental, formando gotículas similares as de orvalho sobre a superfície foliar.

Para fins de análise estatística, cada condição de exposição de solo, em cada cultivar, foi considerada como uma população de dados independentes. Desta forma, os três tratamentos foram fatores fixos no modelo de análise de variância. Quando ocorria diferença significativa entre os tratamentos pelo F-teste, ao nível de probabilidade de 5%, as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey.

2. A modificação do ângulo de elevação solar foi avaliada por meio de medições seqüenciais da reflectância, no dia 14 de agosto de 2007. Entre 07:00 e 17:00 horas, o NDVI foi medido nos dois experimentos, de hora em hora, ao longo da unidade experimental.

Para a análise estatística, cada hora foi tratada como um tratamento, de forma que os fatores ambientais durante este momento refletissem um conjunto de modificações sobre o NDVI medido. Foi realizado o teste-t de comparação de médias. O NDVI foi considerado diferente entre as horas, quando alcançada diferença significativa ao nível de probabilidade de 5%. Neste caso, as médias foram comparadas entre si, através do teste de Tukey.

3.3. LINHA DE ESTUDO III

Dois experimentos foram instalados, no ano de 2006, um em resteva de milho e outro em soja. O manejo, empregado na condução destes ensaios, foi idêntico a LINHA DE ESTUDO II.

O experimento, para cada resteva, foi instalado com os seguintes tratamentos: a) espécies de cereal de estação fria (trigo e cevada); b) cultivares dentro de cada espécie: três de trigo (ÔNIX, SAFIRA e FUNDACEP 51) e duas de cevada (MN 743 e BRS 195); c) densidades de semeadura: a indicada (250 e 300 sementes aptas m^{-2} para cevada e trigo, respectivamente); 150 sementes aptas m^{-2} acima da indicada e 150 sementes aptas m^{-2} abaixo da indicada; d) níveis de nitrogênio na semeadura: sem N, 20, 40, 60 e 80 $kg\ ha^{-1}$ de N, na forma de uréia.

Os tratamentos foram selecionados com o objetivo de simular a maior diversidade de condições de variabilidade espacial existentes em lavouras comerciais. As cultivares selecionadas foram escolhidas visando obter diversidade de interações dossel x superfície de fundo. A escolha priorizou as seguintes características: ciclo de desenvolvimento, porte, hábito de crescimento, potencial de afilamento e susceptibilidade ao acamamento (Tabela 2).

O experimento foi conduzido em fatorial, no delineamento experimental de parcelas sub-subsubdivididas, com quatro repetições por tratamento, onde os fatores espécie, cultivar, densidade e dose nitrogenada foram alocados na parcela principal, sub-parcela, sub-subparcela e sub-subsubparcela, respectivamente. Cada unidade experimental foi composta por uma área de 9,95 m^2 . Nela foram semeadas 13 linhas espaçadas em 0,17 m.

As avaliações e amostragens foram realizadas, por ocasião da emissão da sexta folha e constaram da: leitura da reflectância do dossel, número de colmos m^{-2} , biomassa acumulada na parte aérea ($kg\ ha^{-1}$), teor de nitrogênio no tecido foliar e N acumulado na parte aérea. Parte destes resultados é apresentada nos Apêndices 4 e 5.

A construção do modelo, de ajuste de classes de potencial produtivo, seguiu a assertiva de que a correlação adotada seria aquela que apresentasse melhor associação entre o NDVI e a variável de planta escolhida na LINHA DE ESTUDO II. A metodologia, utilizada para geração do modelo de determinação das classes de potencial produtivo, será descrita no capítulo “Resultados e Discussão”, pois fará parte do desenvolvimento do trabalho.

No final do ciclo, imediatamente antes da colheita de grãos, foi realizada a contagem do número de espigas, em dois metros por parcela, sendo obtido o número de espigas m^{-2} . Por ocasião da colheita de grãos (na área de $7,3 m^2$), nos dias 30 de outubro de 2006 e 11 de novembro de 2007, foi avaliado o rendimento de grãos em $kg ha^{-1}$, na umidade de 13%, e os demais componentes do rendimento. Estes resultados estão apresentados nos Apêndices 6,7,8 e 9.

3.4. LINHA DE ESTUDO IV

A lavoura comercial de trigo, localizada no município de Victor Graeff (RS), foi conduzida de acordo com o nível tecnológico do produtor escolhido. A semeadura foi realizada em 25 de maio de 2006, sobre resteva de soja, utilizando a cultivar de trigo FUNDACEP 51. A adubação utilizada pelo produtor constituiu em 350 kg da fórmula 5-20-20, realizada por ocasião da semeadura.

No dia 1º de agosto de 2006, as plantas se encontravam na emissão da sétima folha. Na área selecionada de 7,3 ha, dentro desta lavoura, antes da aplicação do N em cobertura, foram realizadas amostragens georreferenciadas utilizando um receptor GPS (marca Garmin modelo CS60). O atraso na amostragem, em relação ao estágio da emissão da sexta folha, foi consequência do excesso de chuvas no período impedindo o deslocamento para a região no momento considerado ideal.

As amostragens acompanharam a linha de semeadura, sendo paralelas umas às outras. Cada ponto foi espaçado em aproximadamente 20 m entre si (grid de 20 x 20 m), correspondendo a uma amostra a cada 400 m² e totalizando 119 pontos (Figura 1). O número de amostragens foi suficiente para obter uma mínima variabilidade espacial de relevo, com as observações variando de 490 a 500 m de altitude (Figura 2).

As avaliações realizadas foram as mesmas feitas por ocasião da emissão da sexta folha da LINHA DE ESTUDO III. A medição da reflectância e a coleta de plantas se fizeram em uma área de 0,3 m².

No final do ciclo, foi realizada a colheita de grãos (manualmente), no dia 31 de outubro de 2006, em uma área de 0,3 m² ao lado da área amostrada anteriormente (aproximadamente 1 m em relação à amostragem anterior). Após a trilha, foi avaliado o peso de grãos e extrapolado para rendimento de grãos (kg ha⁻¹) na umidade de 13%.

As variáveis foram submetidas a análise de dependência espacial, utilizado-se o programa computacional GS⁺® 7.0 (Gamma Design Software). Após o ajuste dos modelos teóricos de semivariogramas, foi efetuada a construção de mapas de isolinhas, a partir da interpolação por krigagem pontual, localizando-se espacialmente nas áreas, os domínios dos níveis de cada variável. A eficiência do interpolador escolhido, em estimar os valores das observações em áreas não amostradas da lavoura, foi avaliada por meio da validação cruzada.

TABELA 2. Características agrônômicas das cultivares utilizadas na LINHA DE ESTUDO III. EEA/UFRGS, RS, 2006.

Espécie	Cultivar	Instituição desenvolvedora	Ciclo ^{1,2} (dias)	Porte ² (cm)	Hábito de crescimento ³	Potencial de afilhamento ³	Suceptibilidade ao acamamento ²
cevada	BRS 195	Embrapa Trigo	135	65 cm (baixa)	Semi-prostrado	Alto	Resistente
cevada	MN 743	AMBEV	129	86 cm (média)	Semi-ereto	Médio	Moderadamente resistente
trigo	FUNDACEP 51	Fundacep	146	92 cm (média à alta)	Ereto	Médio	Moderadamente susceptível
trigo	SAFIRA	OR Sementes	142	89 cm (média)	Semi-prostrado	Alto	Moderadamente susceptível
trigo	ÔNIX	OR Sementes	140	87 cm (média)	Ereto	Médio	Moderadamente resistente

¹ Entre a emergência e a maturação fisiológica.

² Embrapa Trigo (2005): referente às cultivares de Cevada. Embrapa Trigo (2007): referente às cultivares de Trigo.

³ Fundacep (2008): referente a cultivar FUNDACEP 51. OR Sementes (2008): referente às cultivares ÔNIX e SAFIRA. Cairão, E. (2005): referente a cultivar MN 743.

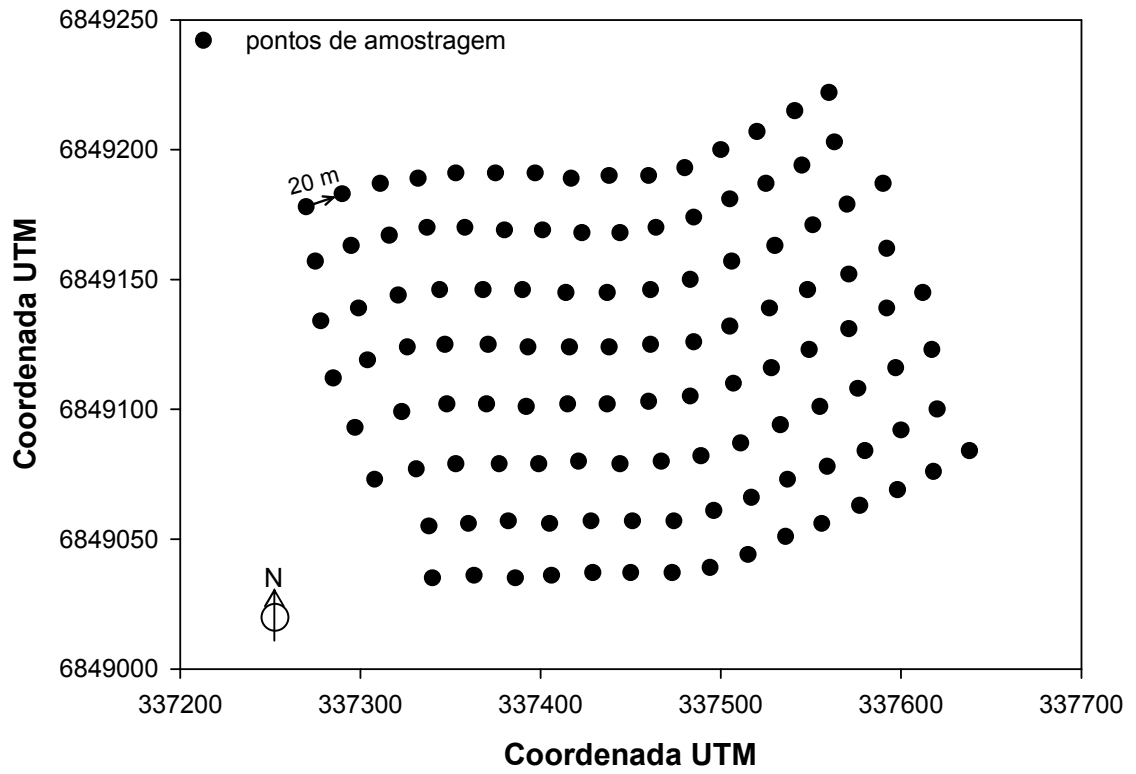


FIGURA 1. Pontos de amostragem georreferenciados (grade amostral) para medições do NDVI e coleta de plantas de trigo. Victor Graeff, RS, 2006.

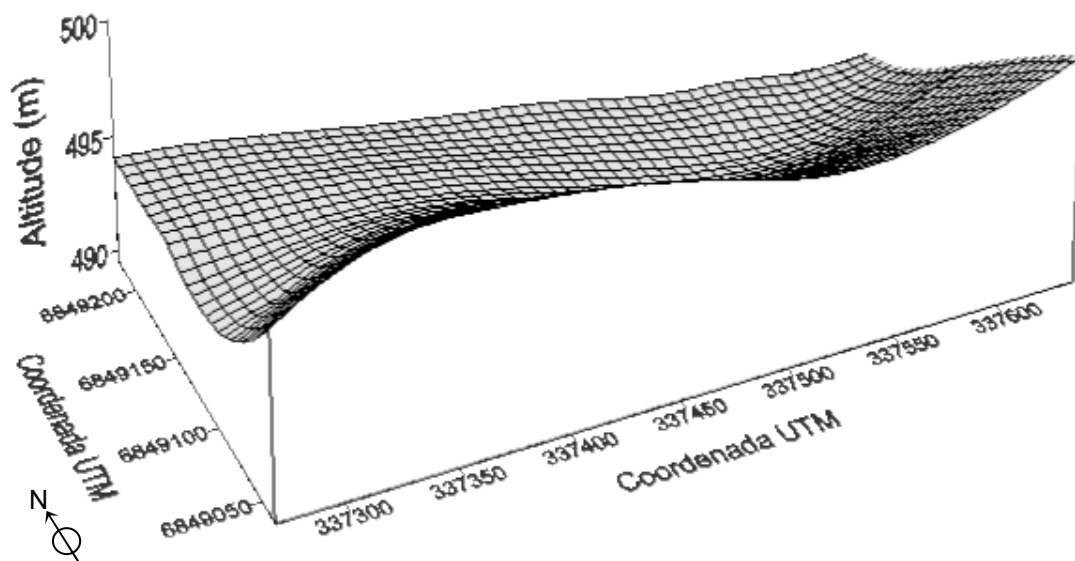


FIGURA 2. Altimetria (m) do relevo da lavoura de trigo ao longo da área de amostragem. Victor Graeff, RS, 2006.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelo para correção dos fatores que interferem no NDVI

A aplicação do sensor GreenSeeker deve considerar os principais elementos que influenciam a eficiência da leitura do NDVI, como indicador da condição nutricional de plantas. Esses elementos, que ocorrem freqüentemente ao longo da área em uma lavoura, foram grupados em três fatores:

- 1) **Superfície de fundo:** refere-se aos elementos que ocorrem sob o dossel de plantas, na superfície do fundo, e que afetam a leitura do sensor. A “superfície de fundo” é caracterizada como o solo, mais o resíduo sobre ele. O termo “resíduo” foi considerado como a palha da cultura antecessora deixada sobre a superfície do solo mais este agregado a ela. O termo “palha” refere-se ao resíduo sem a presença de solo agregado. A palha foi obtida quando o resíduo foi lavado para retirada da fração de solo agregado a ele (vide MATERIAL E MÉTODOS pg. 22).
- 2) **Dossel:** refere-se a estrutura da planta determinada por elementos morfológicos, fisiológicos e anatômicos e que afetam a leitura do sensor. Este é o componente mais importante para fins de recomendação nitrogenada, pois ele representa, na forma mais precisa possível, o status nitrogenado das plantas;
- 3) **Meteorológicos:** refere-se aos elementos que interagem com a superfície de fundo e o dossel, sendo que foram avaliados, neste trabalho, a quantidade de

radiação incidente, a modificação do ângulo de elevação solar e a presença de molhamento sobre o dossel (derivado de precipitação pluvial ou orvalho).

O grupamento utilizado foi adaptado de Ponzoni (2001). Este considerou os seguintes fatores que interferem na reflectância da radiação: dossel, solo, atmosfera, propriedades do detector e fonte de radiação. No sensor GreenSeeker, a superfície de fundo é o componente que pode alterar as leituras do sensor sobre uma mesma cultivar, de maneira a causar interferências sobre o valor real do dossel em si. Também as características do dossel poderão ser modificadas em função dos aspectos agronômicos específicos de cada cultivar, podendo alterar as leituras de um genótipo a outro (Moreira *et al.*, 2005). Quanto ao detector, não é esperada nenhuma correção, visto que as configurações já são pré-definidas pelo fabricante.

No trabalho, os prováveis efeitos destes fatores foram objeto de análise, em diversas condições experimentais, objetivando a criação de um modelo de correção para obtenção do NDVI do dossel. Ao final, em condições de lavoura, o valor de NDVI deve ser corrigido em função deste modelo, caso se verifique a ocorrência de algum dos fatores considerados.

4.1.1. O efeito dos elementos da superfície de fundo

Os elementos da superfície de fundo foram analisados com base na LINHA DE ESTUDO I e que são: a) quantidade de palha no resíduo; b) fração de solo agregada à palha; c) umidades da palha e do solo; d) exposição ou não dos resíduos sob o sensor; e) tipo de resíduo existente sobre a superfície do solo.

A escolha dos elementos de estudo foi baseada no fato de que a interação, entre eles, determina o grau de modificação do NDVI e não apenas um elemento isolado (Huete, 1985). O experimento para validação deste princípio baseou-se

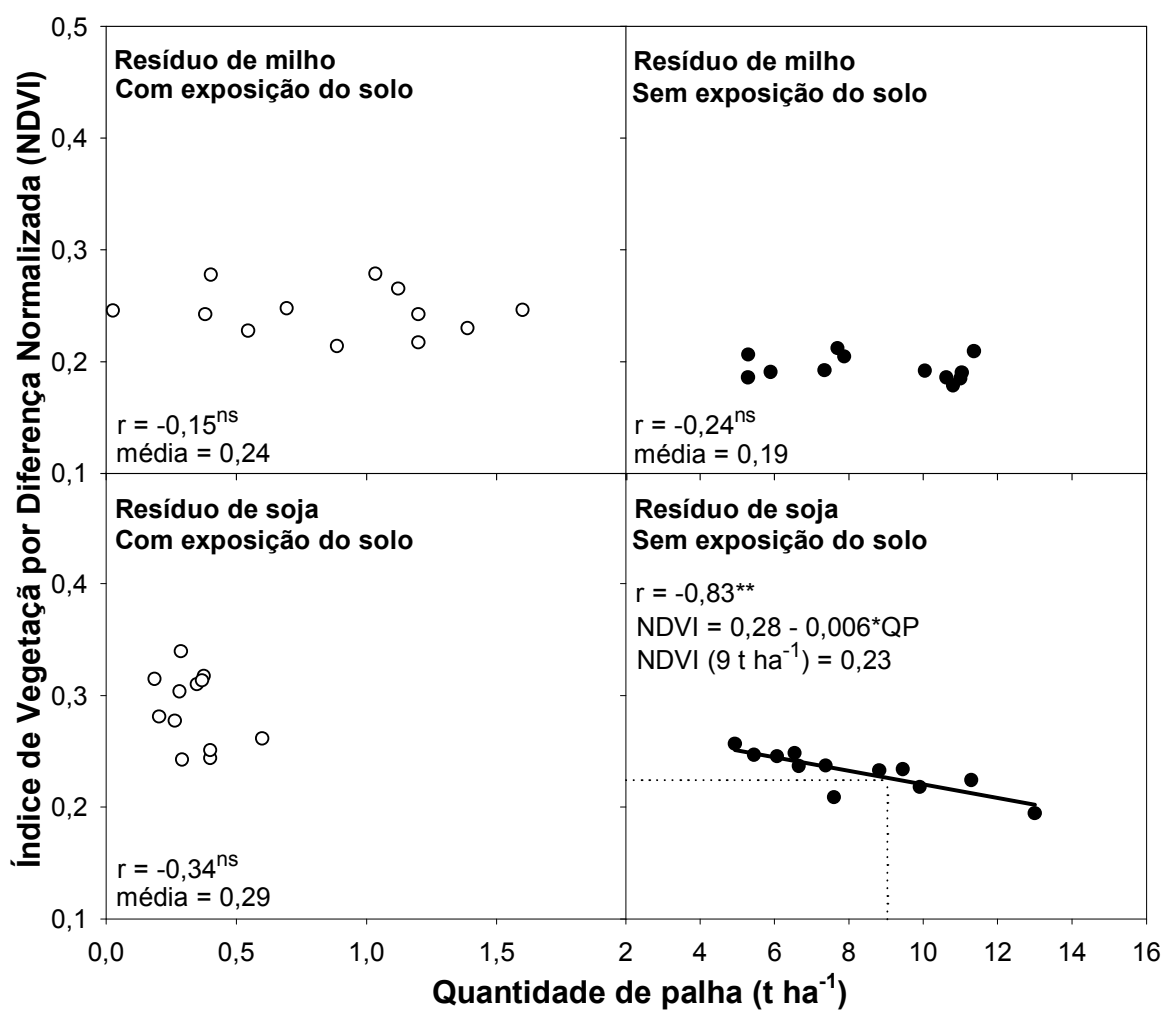
nas leituras de NDVI que foram obtidas por meio de amostragens temporais nas unidades experimentais, totalizando 12 observações por tratamento. Estes foram: tipo de resíduo (soja e milho) e exposição do solo (com e sem).

Ao longo das 12 observações, a quantidade de palha amostrada para o tratamento “com exposição do solo” variou entre 0 e 2 t ha⁻¹ para milho e 0 e 1 t ha⁻¹ para soja. Já no tratamento “sem exposição do solo”, a quantidade de palha variou entre 5 e 12 t ha⁻¹ para milho e entre 5 e 14 t ha⁻¹ para soja (Figura 3). A alta variabilidade entre amostragens foi decorrente do efeito da decomposição semanal dos resíduos, em associação ao baixo número de repetições. Porém, serviu para quantificação do efeito da alta e baixa quantidade de palha sobre a modificação do NDVI.

4.1.1.1. Componentes do resíduo (palha, fração de solo e umidades)

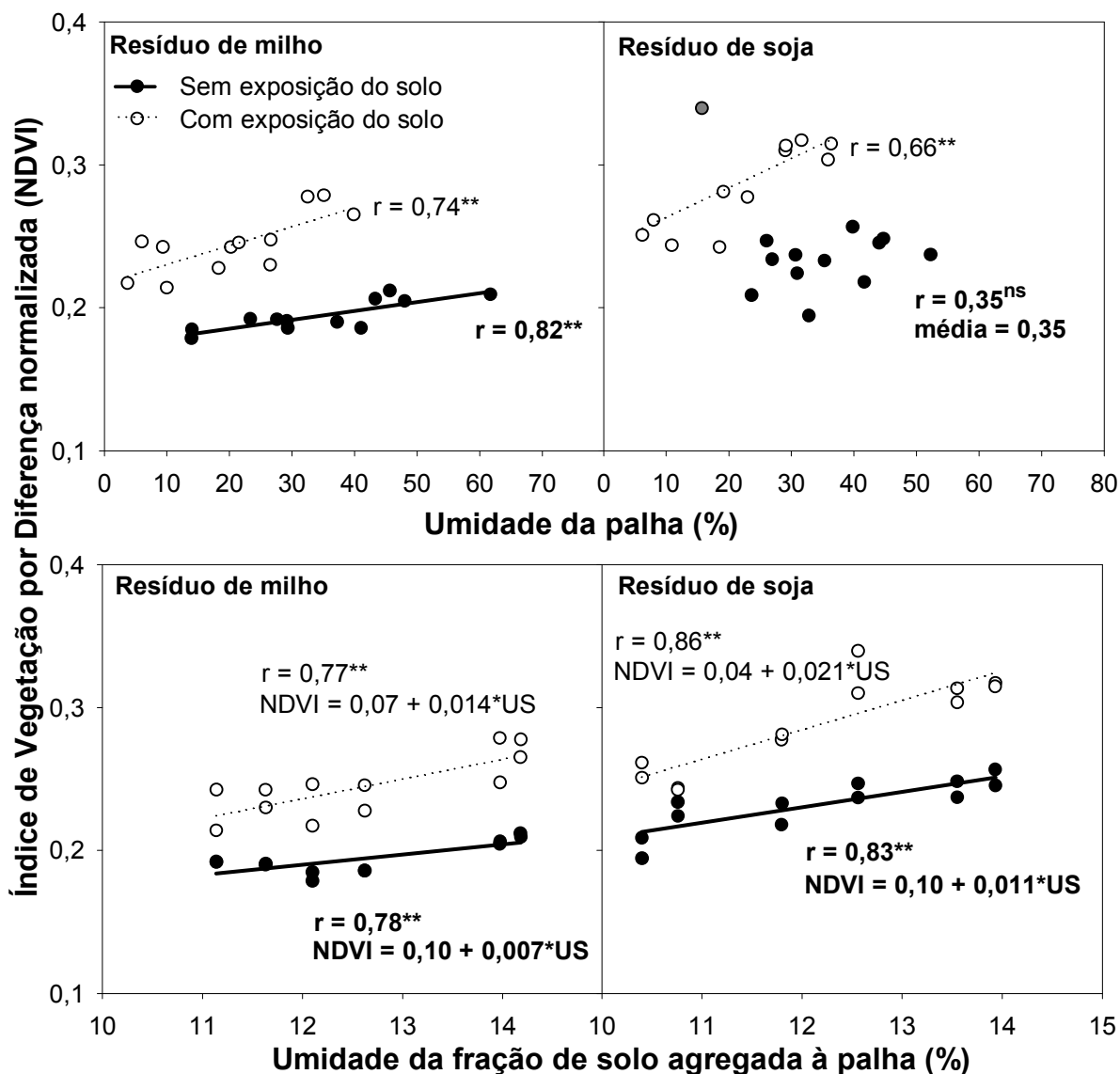
O componente “quantidade de palha” foi associada com as leituras do NDVI, sendo significativa apenas no tratamento “sem exposição do solo” em “resíduo de soja”, havendo decréscimo do NDVI em função do aumento da quantidade de palha (Figura 3). Sullivan *et al.* (2004), trabalhando com diferentes taxas de adição de palha de trigo sobre o solo, determinaram menor reflectância com o aumento do percentual de cobertura da palha sobre o solo. Porém, esta condição não foi encontrada nos demais tratamentos (Figura 3), sendo indicativa da possível influência de outros elementos da superfície de fundo, independentes da “quantidade de palha”.

O componente “umidade da palha”, correlacionou-se com o NDVI para todos os tratamentos, com exceção novamente, do tratamento “resíduo de soja” e “sem exposição do solo” (Figura 4).



** Correlação significativa entre as variáveis a 1% de probabilidade pelo t-teste.

FIGURA 3. Correlação entre a quantidade de palha (QP) com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.



** Correlação significativa entre as variáveis a 1% de probabilidade pelo t-teste.

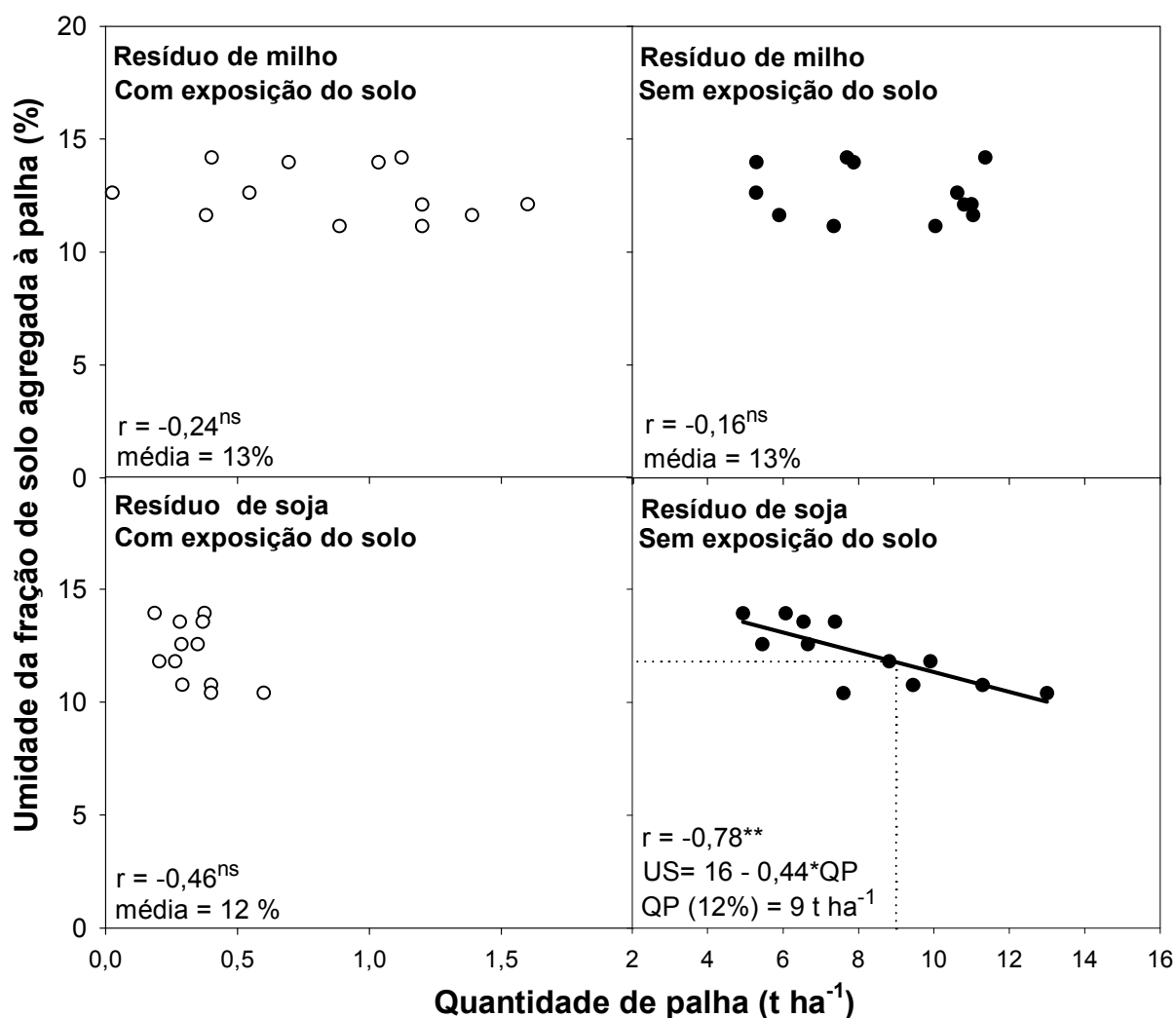
○ Valor atípico, desconsiderado no ajuste da regressão.

FIGURA 4. Correlação entre a umidade da palha e a umidade da fração de solo agregada à palha (US) com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.

Já o componente “umidade da fração de solo agregado à palha”, mostrou correlação significativa com o NDVI para todos os tratamentos (Figura 4), de forma que o NDVI aumentou com o incremento desta umidade. Foi feita análise da associação deste componente com a “quantidade de palha”. Novamente, no tratamento “sem exposição do solo” em “resíduo de soja”, o aumento da “quantidade de palha” resultou em diminuição da “umidade da fração de solo agregado à palha” (Figura 5). Nos demais tratamentos, esta associação se manteve constante (Figura 5).

A “umidade da fração de solo agregado à palha” é, portanto, o componente do resíduo determinante na modificação do NDVI, pois age sobre todos os tratamentos. A relação deste componente com o NDVI é pouco avaliada e os trabalhos são escassos, por esta ser uma avaliação muito específica. Mas Nagler *et al.* (2000), avaliando a resposta espectral de diferentes tipos de cobertura de solo sob sistemas irrigados e não-irrigados, a partir da banda TM3 e TM4 do satélite LANDSAT, encontraram valores de reflectância menores para todos os resíduos sob condições de irrigadas, quando comparados à sua condição seca. Este resultado é determinado pelo efeito da umidade que diminui a reflectância de todos os comprimentos de onda. Porém, entre o vermelho e o infravermelho próximo, esta diminuição é maior neste último, pois este é mais sensível à presença das moléculas de água. A consequência é um aumento no gradiente entre os comprimentos de onda elevando o NDVI.

Já o resultado isolado observado para a relação do NDVI com o resíduo de soja (Figuras 3) provavelmente é determinado pela íntima relação: fração de solo x quantidade de palha.



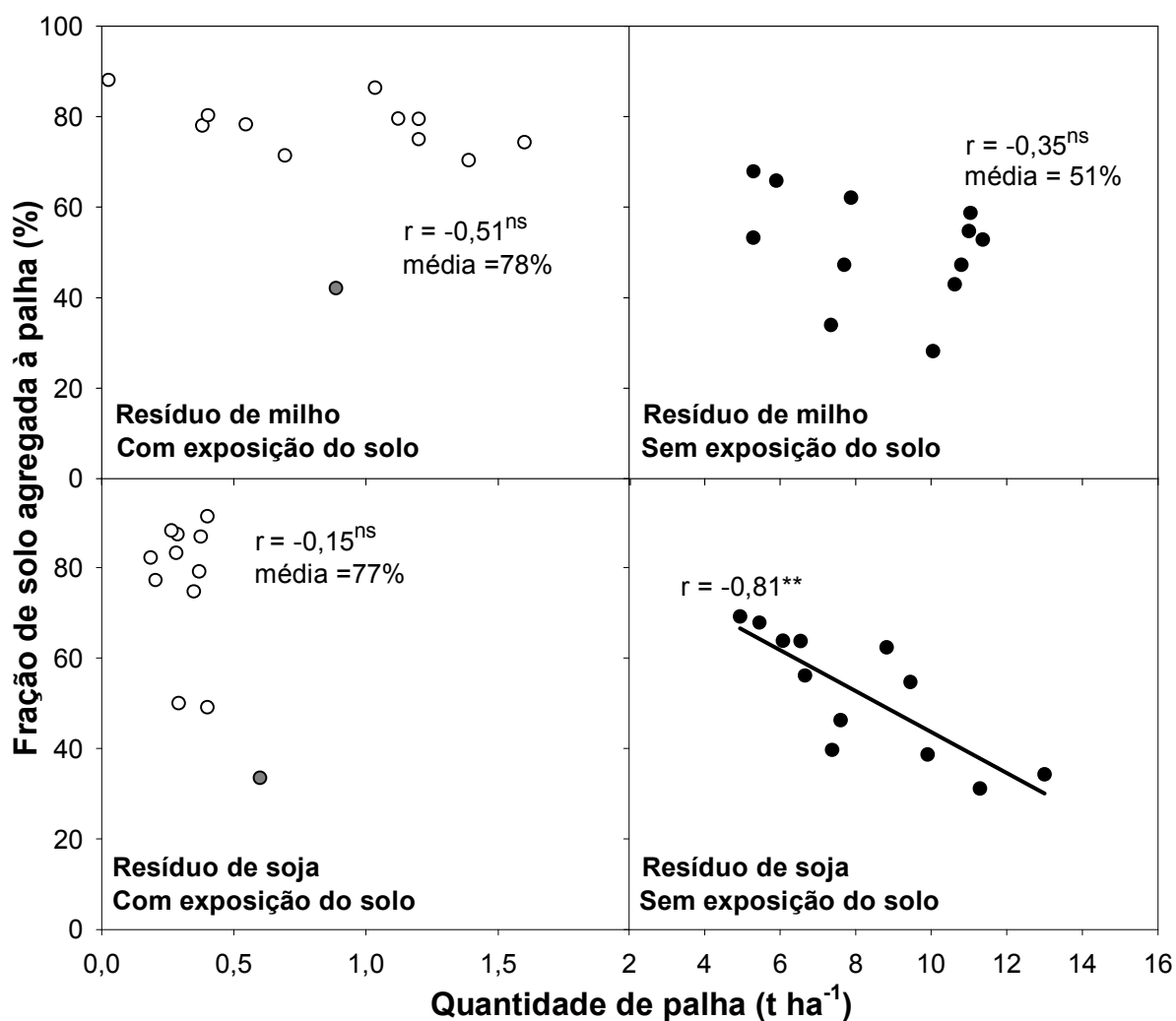
** Correlação significativa entre as variáveis a 1% de probabilidade pelo t-teste.

Figura 5. Valor máximo e mínimo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e biomassa acumulada na parte aérea (valores críticos), obtidos a partir das regressões apresentadas nas Figuras 19 e 20, nas cinco cultivares, nos resíduos de milho e soja. EEA/ UFRGS, RS, 2006.

À medida que aumenta a quantidade de palha, neste resíduo, a “fração de solo agregado à palha” diminui (Figura 6). Portanto, é esperado que a umidade desta fração (Figura 5) e o NDVI (Figura 3) também diminuam. Por outro lado, no resíduo de milho e nas condições “com exposição do solo”, não houve efeito da relação fração de solo x quantidade de palha. A “fração de solo agregada à palha” foi constante e independente da quantidade de palha (Figura 6). O NDVI, nestes casos, é relacionado a modificação da umidade, tanto da palha, como da “fração de solo agregado à palha” (Figura 4).

Resultado semelhante foi encontrado por Daughtry *et al.* (2004), avaliando a relação entre a flutuação estacional da decomposição de resíduos de milho e soja ao longo de oito semanas com a modificação de suas propriedades ópticas, e verificaram menores valores da reflectância para os resíduos de soja, quando submetidos à irrigação e em comparação aos resíduos de milho. Este comportamento diferencial entre os resíduos pode ser entendido pelo trabalho de Bayer *et al.* (2000) que utilizaram a razão lignina / N para prever o comportamento do tempo para decomposição total de resíduos vegetais, assim como, sua contribuição de carbono e nitrogênio totais. Os autores verificaram que as leguminosas apresentaram o maior percentual de partículas em decomposição, sendo uma das justificativas para este caso, a maior quantidade de microagregados deste resíduo do que em comparação às gramíneas.

Portanto, é esperado que, à medida que a “quantidade de palha” do resíduo de soja aumenta o percentual de solo agregado a esta palha diminua, pois cai a relação entre elementos orgânicos com elevada decomposição e aqueles com maior granulometria. Portanto, o NDVI do resíduo da soja é dependente da quantidade de solo agregado à palha enquanto que no milho não.



** Correlação significativa entre as variáveis a 1% de probabilidade pelo teste-t.

● Valor atípico, desconsiderado no ajuste da regressão.

FIGURA 6. Correlação entre a quantidade de palha com “fração de solo agregada à palha”, em seis épocas de amostragem, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.

A “umidade da fração de solo agregada a palha” relacionou-se ao NDVI de maneira similar, para todos os tratamentos (Figura 4), diferente dos outros componentes analisados. Já a “umidade da palha” pode ser considerada, como elemento dependente da “umidade da fração de solo agregado à palha”. No trabalho de Daughtry *et al.* (2004), foi verificado que as partículas do solo agregadas à palha, absorvem a radiação incidente antes que atinjam o material vegetal do resíduo. Desta forma, com o aumento da umidade, provavelmente ocorre a alteração das características ópticas do solo no primeiro momento, seguido pela modificação da palha. Portanto, o modelo para a correção do NDVI deve iniciar com componente “umidade da fração de solo agrado à palha” que é, na verdade, o reflexo da umidade do solo, pois foi obtido a partir deste (vide MATERIAL E MÉTODOS pg. 22).

No modelo deve haver uma umidade de solo considerada referência, a fim de estabelecer um padrão. A umidade do solo referência foi 12,5% do peso seco do solo. Este valor é a média das 12 amostragens realizadas nos tratamentos, obtida a partir da Figura 5. Conseqüentemente, a alteração do NDVI devida a mudança da umidade do solo, foi obtida a partir do ajuste de regressões lineares entre a “umidade fração de solo agregada a palha” com o NDVI (Figura 4).

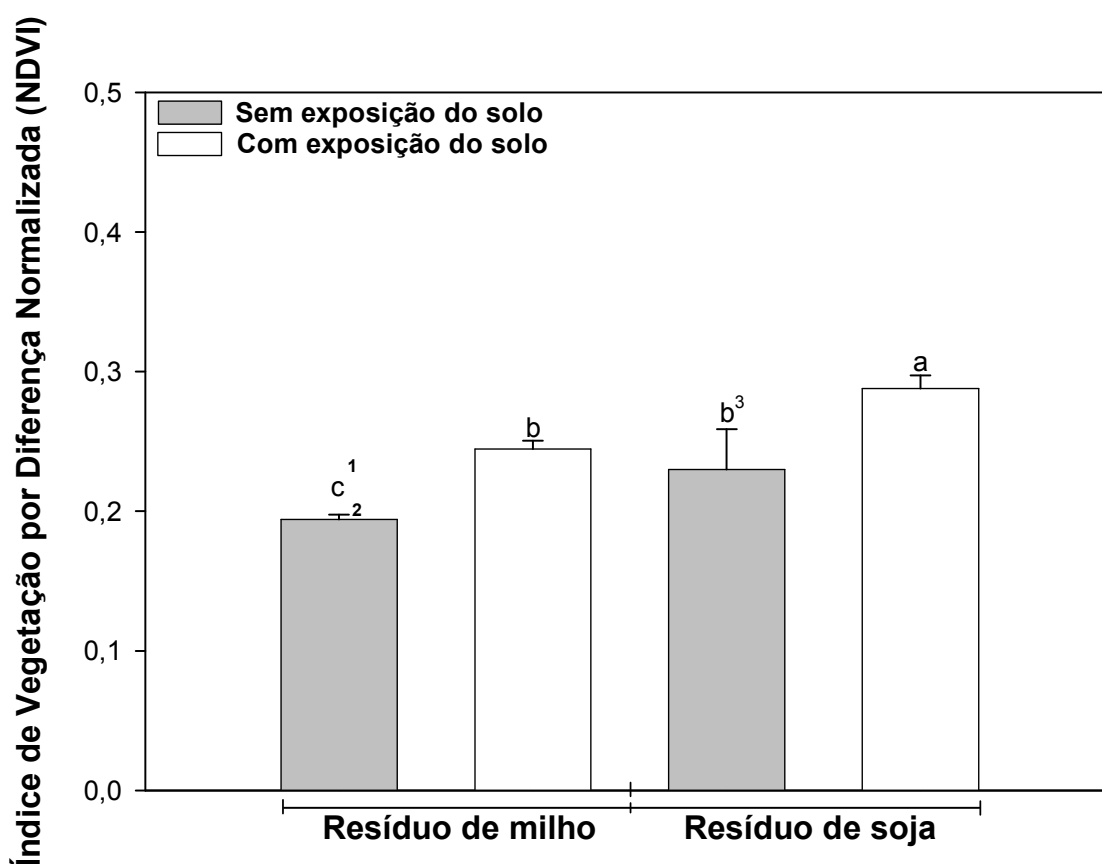
4.1.1.2. Exposição do solo e tipos de resíduo

Os outros elementos da superfície de fundo que modificam o NDVI são: exposição do solo sob o sensor e o tipo de resíduo. A análise dos dados foi realizada sobre os valores médios das amostragens para cada tratamento (considerando a umidade do solo de 12,5%). O maior NDVI ocorreu no tratamento, “com exposição do solo” sob “resíduo de soja”. Já o menor NDVI

ocorreu no tratamento, “sem exposição do solo” sob “resíduo de milho”. Nos outros tratamentos, ocorreram valores intermediários e similares (Figura 7).

A superfície de fundo tem relação direta com a coloração do solo, que pode ter efeito sobre as leituras de NDVI. O solo, onde foram realizados os experimentos, pertence a classe dos Argissolos, caracterizados pela presença de óxidos de ferro que determinam tons avermelhados (Strek *et al.*, 1999). Nestes, existe um pico de absorção da radiação na região do vermelho (Dalmolin, *et al.*, 2005). Além disso, Gao *et al.* (2000) encontraram maior valor de NDVI em solos considerados “escuros” (ricos em matéria orgânica e/ou argilominerais) se comparados a solos considerados “claros” (arenosos). A matéria orgânica assim como solos ricos em argila, por apresentarem maior quantidade de material vegetal, absorvem com maior intensidade a radiação do visível e por apresentarem maior porosidade também absorvem o infravermelho próximo. Porém, este é absorvido em intensidade menor que o vermelho, gerando aumento do gradiente entre estes comprimentos de onda. Desta forma, o gradiente gerado determina um NDVI superior do solo exposto se comparado ao solo que apresenta resíduos vegetais sobre ele, pois nestes, ocorre maior reflectância do vermelho e do infravermelho próximo em intensidades similares e portanto, com menor gradiente entre eles (Daugtry *et al.*, 2004).

Além disso, a intensidade da modificação do NDVI do resíduo é dependente da sua constituição vegetal. O conteúdo de celulose do resíduo tem alta relação com a reflectância. Nagler *et al.* (2000) observaram que a constituição celular da soja apresenta estruturas de menor dimensão e menor conteúdo de celulose se comparada ao resíduo de milho. Tal fato permite maior transmitância da radiação incidente, principalmente do vermelho e menor do infravermelho próximo, levando a um maior NDVI dos resíduos de soja.



¹ Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

² Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

³ A média e o erro-padrão deste tratamento corresponde ao valor predito pela regressão da Figura 5.

FIGURA 7. Valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) dos dados obtidos nas seis amostragens, em áreas sob os resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo. EEA/UFRGS, RS, 2007.

Com base no que foi analisado, o modelo considera os elementos da superfície do fundo (tipo de resíduo e umidade do solo) e a exposição ou não do solo, como elementos de correção do NDVI, cujos valores estão apresentados na Tabela 3. Este modelo será utilizado por ocasião da utilização do sensor em lavouras. Os valores tabelados abaixo deverão ser subtraídos das medições realizadas a campo, obtendo-se o valor do NDVI do dossel sem a interferência destes elementos. O uso inicial parte de uma umidade de solo referência entre 12 e 13%, sendo os valores de NDVI aumentados ou diminuídos pelas constantes, conforme a alteração da umidade do solo em 1% para mais ou para menos.

TABELA 3. Modelo para correção do NDVI em função dos elementos da superfície de fundo.

Exposição do solo sob o sensor	Tipo de resíduo	Valor de correção do NDVI		
		Umidade do solo (%)		
		-1%	12,5	+1%
Não	Milho	-0,01	0,19	+0,01
	Soja	-0,02	0,24	+0,02
Sim ¹	Milho	-0,02	0,25	+0,02
	Soja	-0,03	0,30	+0,03

¹ Corresponde a quantidade de resíduos menor que 2 t ha⁻¹.

4.1.2. O efeito dos elementos do dossel

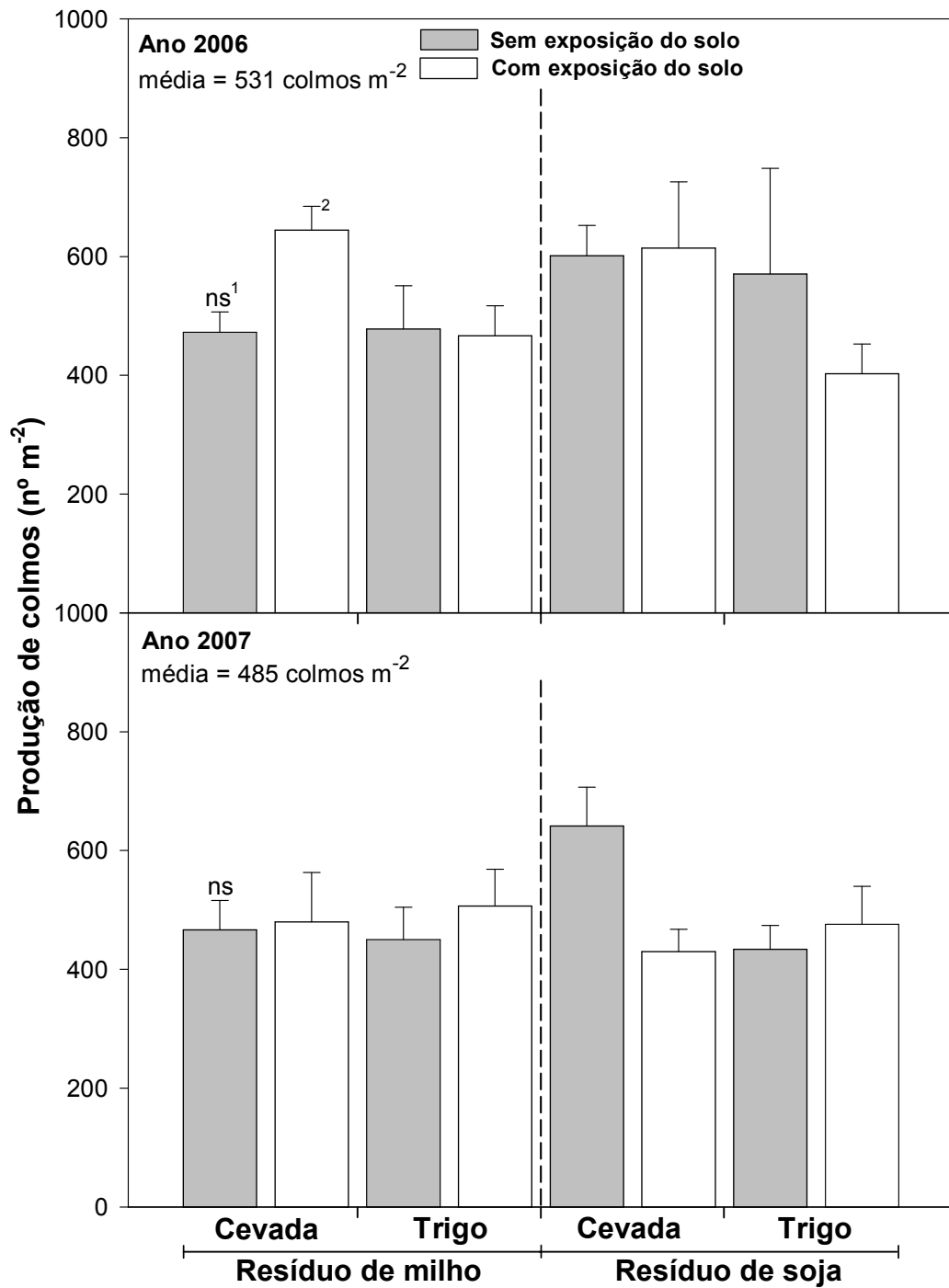
A análise dos elementos de dossel foi realizada por ocasião da emissão da sexta folha, nos experimentos da LINHA DE PESQUISA II. As variáveis de planta avaliadas foram aquelas utilizadas largamente há diversos anos para caracterizar condição nutricional nos cereais de estação fria (Bredemeier, 1999; Wamser, 2002; Polleto, 2004) e que foram: a) número de colmos; b) concentração

de N no tecido foliar; c) biomassa acumulada na parte aérea e d) N acumulado na parte aérea.

Os tratamentos, utilizados neste experimento, têm como objetivo: gerar variabilidade do NDVI e selecionar, por meio dos resultados obtidos, a variável que melhor expresse a variabilidade entre os tratamentos. Na análise de variância (Apêndice 10) foram verificados resultados diferenciados das variáveis aos tratamentos.

O número de colmos ($n^{\circ} m^{-2}$) é uma variável indicadora do padrão de afilhamento nos cereais de estação fria. A produção de colmos é máxima por ocasião da diferenciação das estruturas reprodutivas, quando se inicia o alongamento dos entrenós dos colmos (Wobeto, 1994). Nos dois anos de pesquisa não ocorreu diferença desta variável entre os tratamentos (Figura 8). Dentre os fatores ambientais, a radiação, no período inicial do desenvolvimento das plantas, exerce efeito sobre a formação dos afilhos (Thorne & Wood, 1987), sendo que o número médio de colmos atingido na sexta folha foi 531 e 485 colmos m^{-2} , em 2006 e 2007, respectivamente (Figura 8). Esta similaridade pode ser decorrente da radiação no período inicial da cultura, nos dois anos, que provavelmente foi adequada para expressão desta variável (Figuras 9 e 10). Além disso, ocorreram temperaturas amenas, que favorecem a emissão e sincronização de afilhos (Thorne & Wood, 1987).

Dessa forma, esta variável teve baixa capacidade de refletir as condições diferenciadas das plantas nos tratamentos, o que determinou sua baixa eficiência como indicadora de condição nutricional.



¹ Não existem diferenças significativas entre tratamentos pelo F-teste, à 5% de significância.

² Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 8. Produção de colmos por m⁻², na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

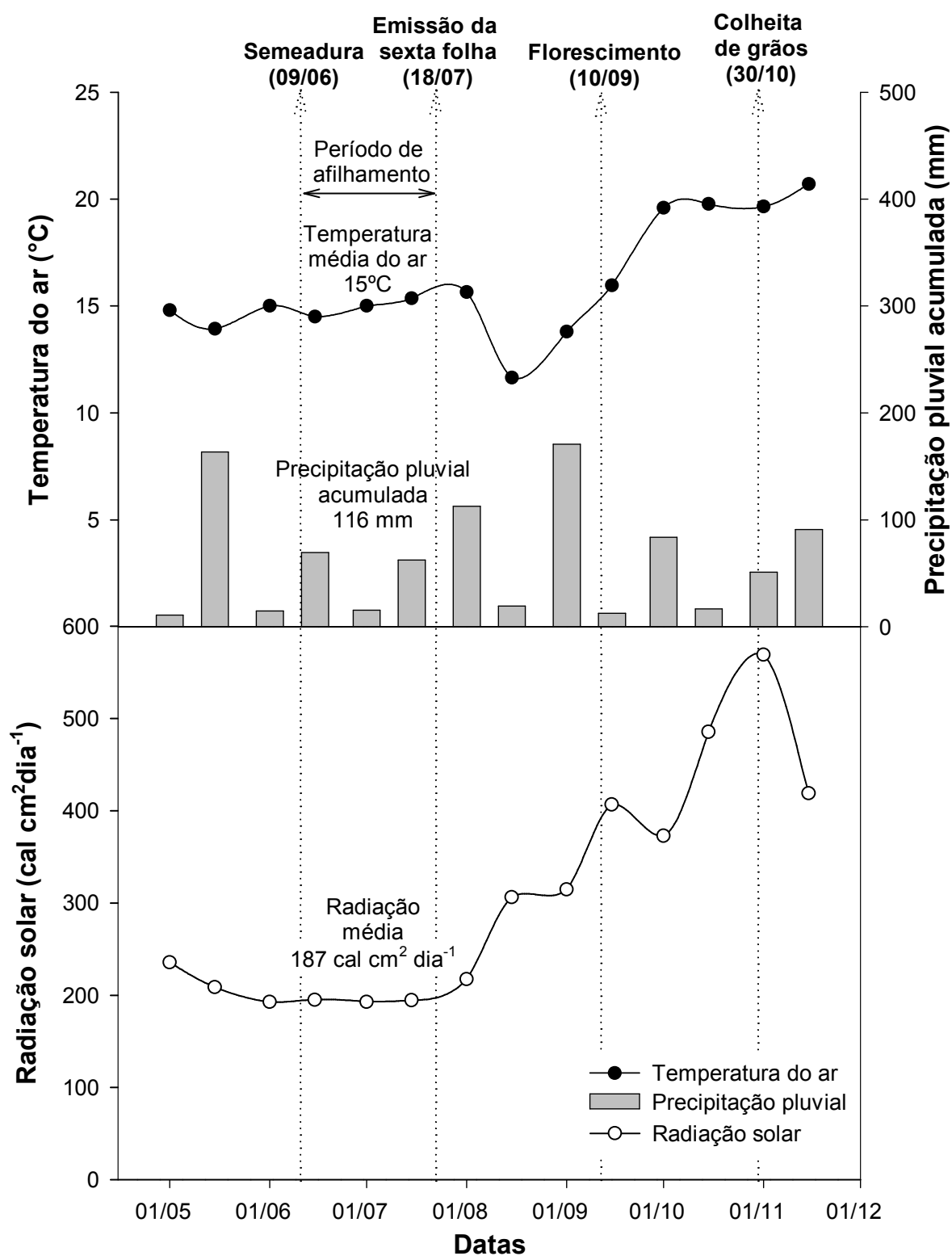


FIGURA 9. Temperatura média do ar, precipitação pluvial acumulada e radiação solar global, no período entre a semeadura e a colheita de grãos, a cada quinze dias. EEA/UFRGS, RS, 2006.

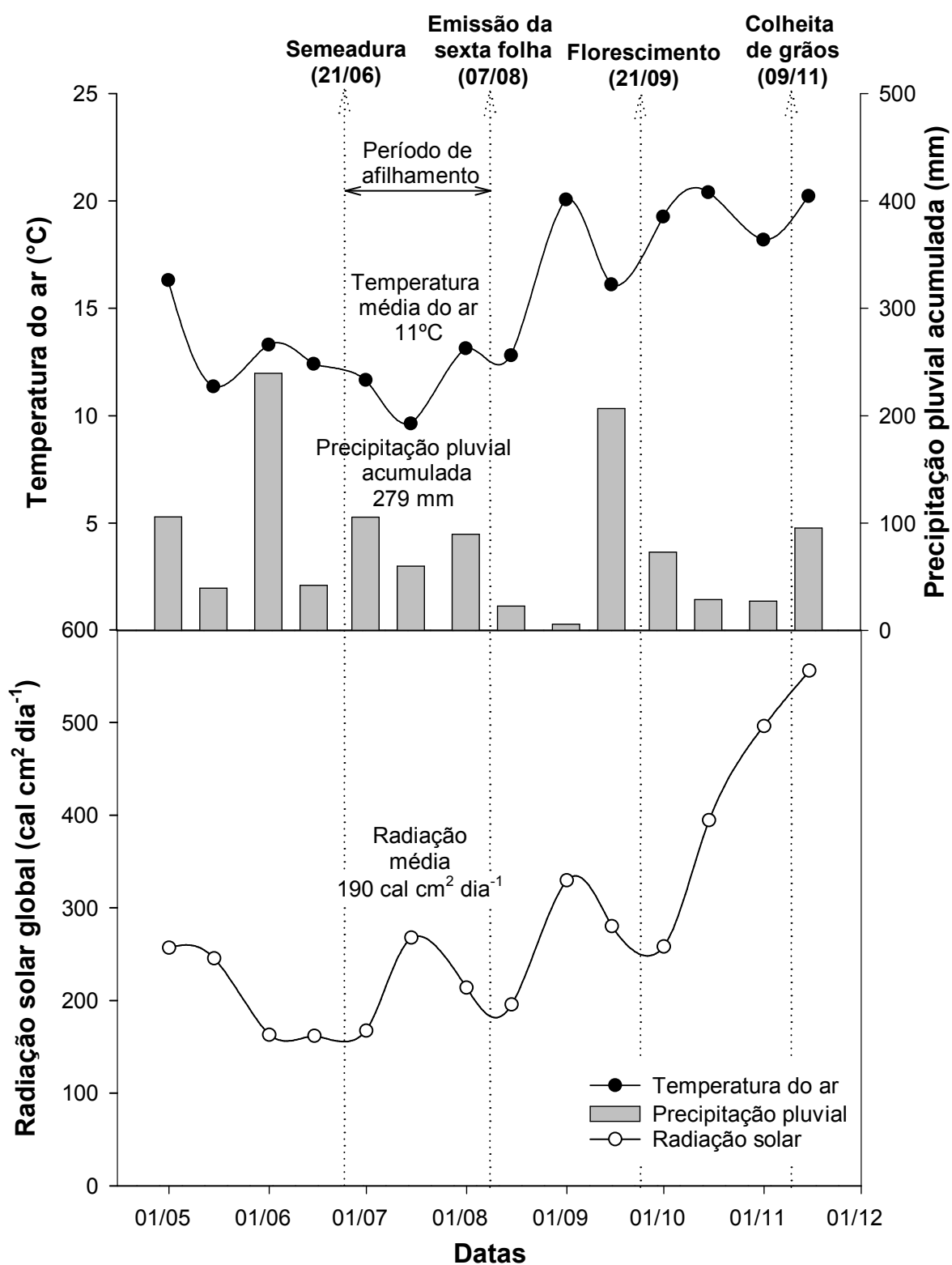
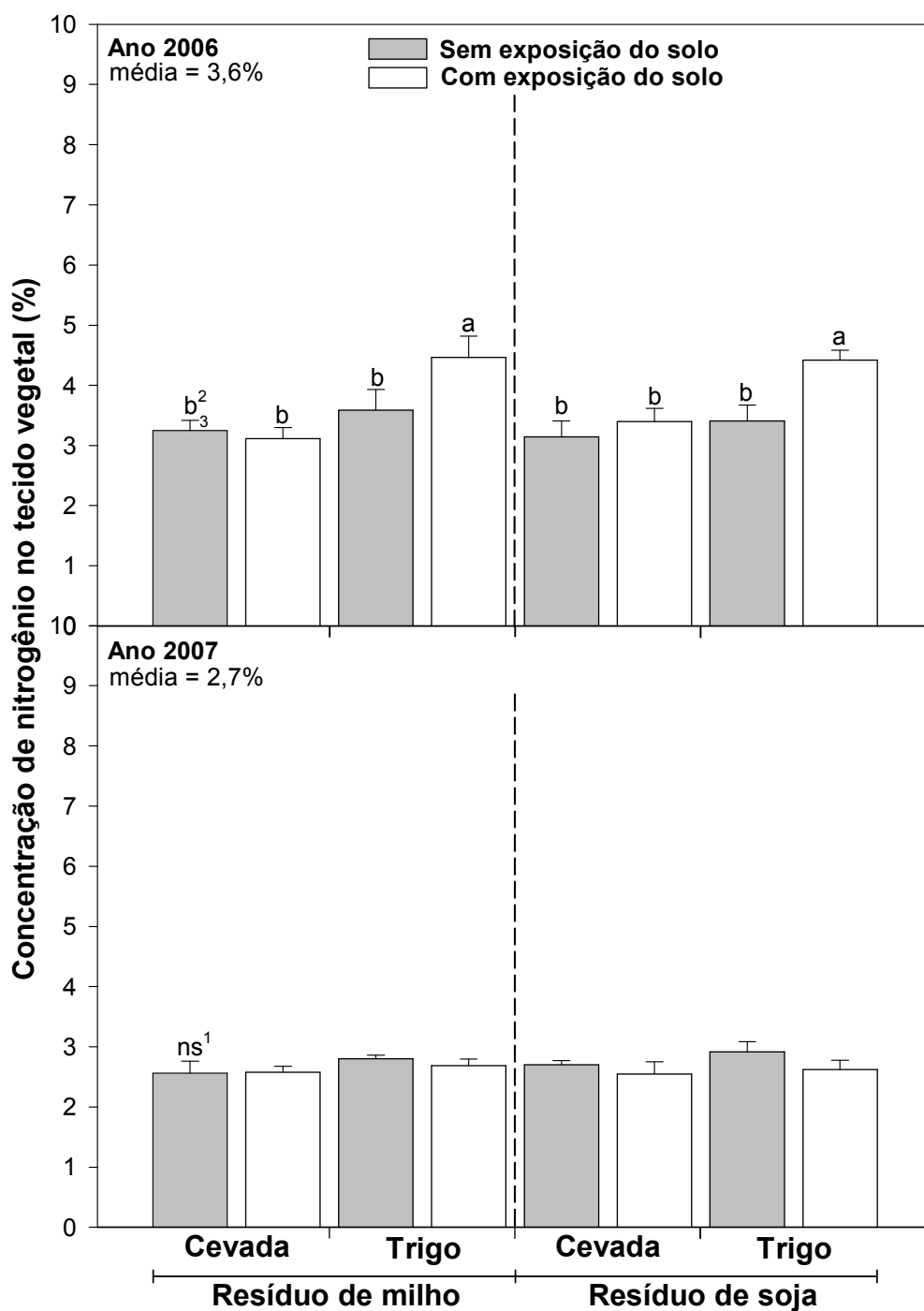


Figura 10. Temperatura média do ar, precipitação pluvial acumulada e radiação solar global, no período entre a sementeira e a colheita de grãos, a cada quinze dias. EEA/UFRGS, RS, 2007.

A concentração de nitrogênio no tecido foliar (%) é um indicador fisiológico que está diretamente ligado a disponibilidade de N no solo e a capacidade da planta em assimilar o N disponível, (Poletto, 2004) desde que conte com a presença de radiação para a absorção do N. No ano de 2007, não ocorreram diferenças entre os tratamentos, com média de 2,7% de N no tecido (Figura 11) devido, provavelmente, ao efeito da precipitação pluvial que determinou a queda nos valores de N mineral do solo. A redução da quantidade de nitratos, no solo, tem relação direta com o aumento da precipitação pluvial (Jaynes *et al.*, 2001) e, portanto, baixos teores de N no solo, no período inicial da cultura, determinam baixo acúmulo de N foliar (Poletto, 2004). Em 2006, houve menor precipitação pluvial acumulada no período do afilhamento do que em 2007 (Figuras 9 e 10), de maneira que os tratamentos expressaram as diferenças na capacidade de absorção pela planta do N disponível no solo, onde o tratamento “com exposição do solo” apresentou maior teor de N foliar. A média dos tratamentos se manteve em 3,6% de N foliar, sendo superior ao ano de 2007 (Figura 11).

Os resultados indicaram que a variável analisada não foi eficiente na maneira de representar o efeito dos tratamentos, pois foi muito influenciado pelas condições ambientais de cada ano. A variação, na concentração do N foliar, é um procedimento estratégico para sobrevivência da planta e nas situações em que há redução acentuada da disponibilidade de N no solo, ocorre o decréscimo significativo do N foliar (Bredemeier, 1999; Polleto, 2004), como foi o caso em 2007.

A biomassa acumulada (kg ha^{-1}), diferente da variável anterior, foi um indicador mais dinâmico, mas também regulado por fatores ambientais (Wamser, 2002).



¹ Não existem diferenças significativas entre tratamentos pelo F-teste, à 5% de significância.

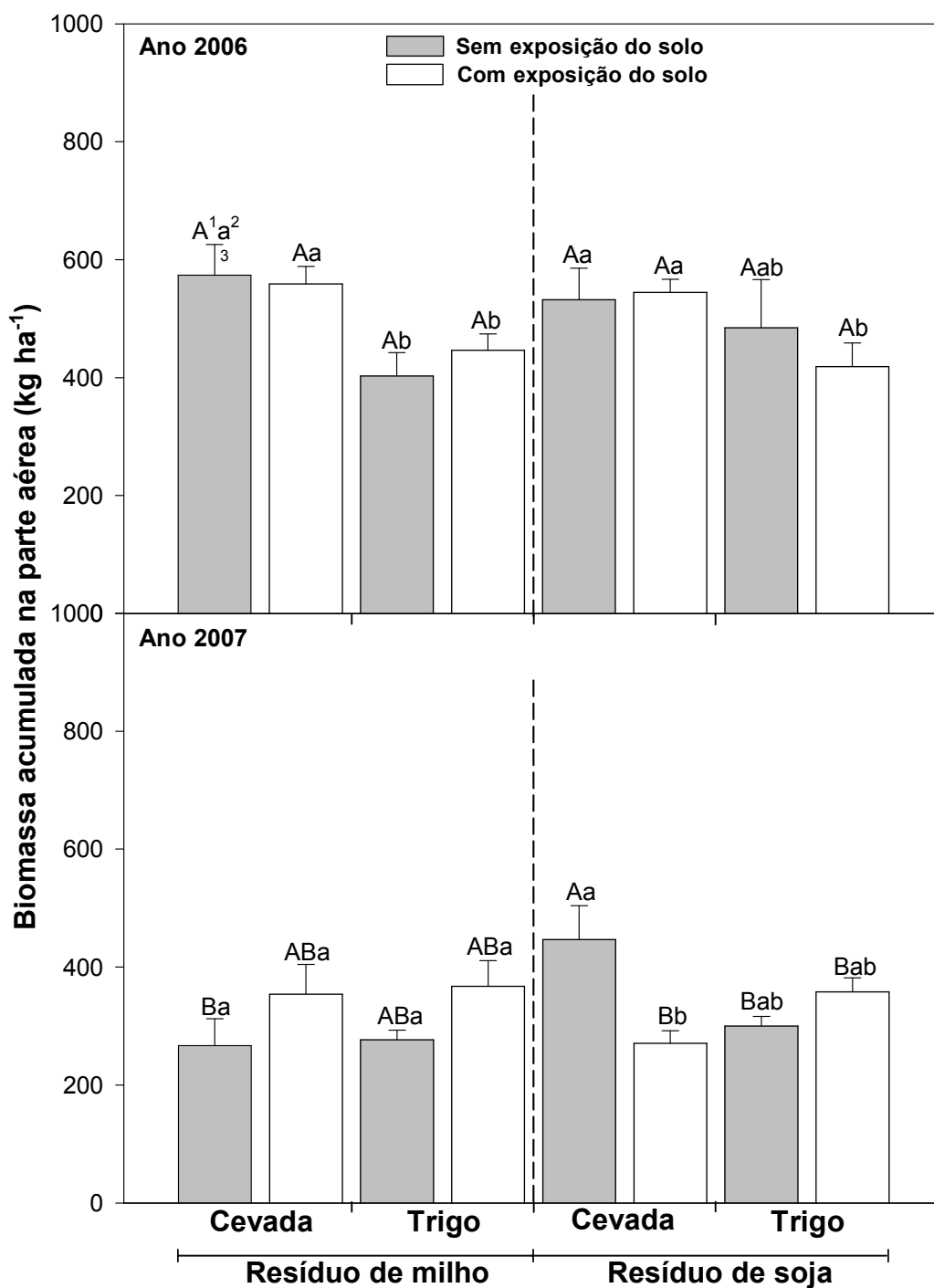
² Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para o mesmo tipo de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

³ Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 11. Concentração de N no tecido foliar, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

A biomassa foi maior em 2006 (495 kg ha^{-1}) do que em 2007 (330 kg ha^{-1}) (Figura 12), mostrando que as condições meteorológicas neste ano foram menos adequadas que 2006 (Figura 10). No período de afilhamento, as temperaturas foram maiores em 2006 do que em 2007 (Figuras 9 e 10) e a menor temperatura, no início do desenvolvimento das plantas determina menor atividade fotossintética, resultando em menor acúmulo de fotossintatos (Thorne & Wood, 1987). Mesmo assim, nos dois anos, houve efeito dos tratamentos, sendo a maior biomassa constatada no tratamento “com exposição do solo” (Figura 12). Portanto, esta variável mostrou-se intimamente relacionada aos tratamentos, pois nos dois anos foi indicado de forma significativa o efeito dos tratamentos sobre a modificação das condições nutricionais das plantas.

O N acumulado na parte aérea (kg ha^{-1}) relaciona a concentração de N no tecido foliar e a biomassa acumulada na parte aérea, representando a relação entre a eficiência das plantas em assimilar o N no solo e a sua conversão em estruturas vegetais (Bredemeier, 1999). Em 2006, não houve diferença entre os tratamentos, com valor médio de $17,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Já em 2007, houve efeito dos tratamentos (Figura 13). As plantas, com maior N acumulado, estavam nos tratamentos “com exposição do solo”, (Figura 13) corroborando com o expresso pela biomassa (Figura 12). Por isso, considerou-se que a diferença entre os tratamentos, foi decorrente prioritariamente da variação da biomassa e não do N foliar. Em 2006, a baixa variação da biomassa associada a ausência de variação do N foliar, determinou ausência de variação do N acumulado. Já em 2007, a variabilidade da biomassa, entre os tratamentos, foi maior do que a variabilidade do N foliar, determinando a variação do N acumulado. Portanto, a biomassa foi considerada como o indicador da condição nutricional da plantas.



¹ Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para diferentes tipos de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

² Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para o mesmo tipo de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

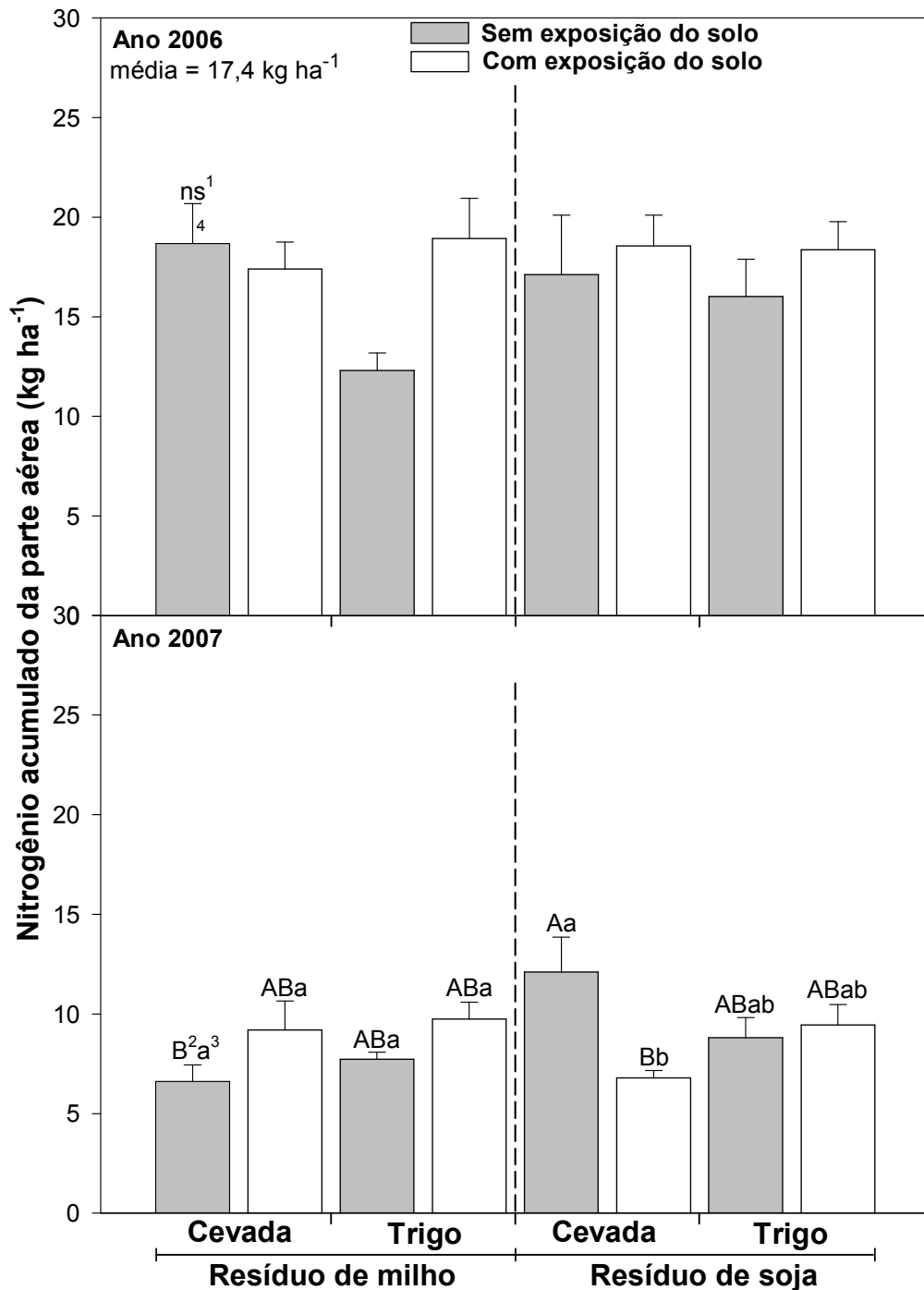
³ Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 12. Biomassa acumulada na parte aérea, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

O NDVI medido, por ocasião da emissão da sexta folha, nos anos de 2006 e 2007, também mostrou diferença entre os tratamentos (Figura 14). Como nas demais variáveis analisadas, no ano de 2006, foram encontrados os maiores valores de NDVI (0,55) em relação ao ano de 2007 (0,40) (Figura 14). Na diferença entre os tratamentos, os resultados foram similares aos encontrados na análise da biomassa (Figura 12). De maneira geral, o tratamento “com exposição do solo” determinou os maiores valores de NDVI. É importante salientar que o principal efeito deste tratamento foi o maior acúmulo de biomassa (Figura 12), pois o incremento do NDVI é, intimamente, correlacionado ao aumento de biomassa (Moges *et al.*, 2004).

Desta forma, pode ter ocorrido a influência conjunta do efeito da “superfície de fundo” com a condição “solo exposto” e a maior biomassa expressa por este. Porém, mesmo havendo o possível efeito da “superfície de fundo” sobre a modificação do NDVI, conforme já discutido anteriormente, confirma-se a eficiência do sensor em expressar as diferentes condições nutricionais das plantas entre os anos e tratamentos.

O passo seguinte foi associar o NDVI às variáveis testadas. Nesta análise, foi examinada qual a condição morfo-fisiológica mais importante para que o sensor expresse a condição nutricional das plantas (Figura 15). A maior associação do NDVI foi com a biomassa e o N acumulado na parte aérea, e a menor foi com a concentração de N no tecido vegetal e o número de colmos (Figura 15). Estes resultados mostram que o comprimento do infravermelho próximo parece ser o componente mais importante na modificação do NDVI. Tal pressuposto coincide com os resultados obtidos por Flowers *et al.* (2003) que desenvolveram modelo de predição do número de afilhos por área em trigo, com base em imagens aéreas obtidas apenas no infravermelho próximo.



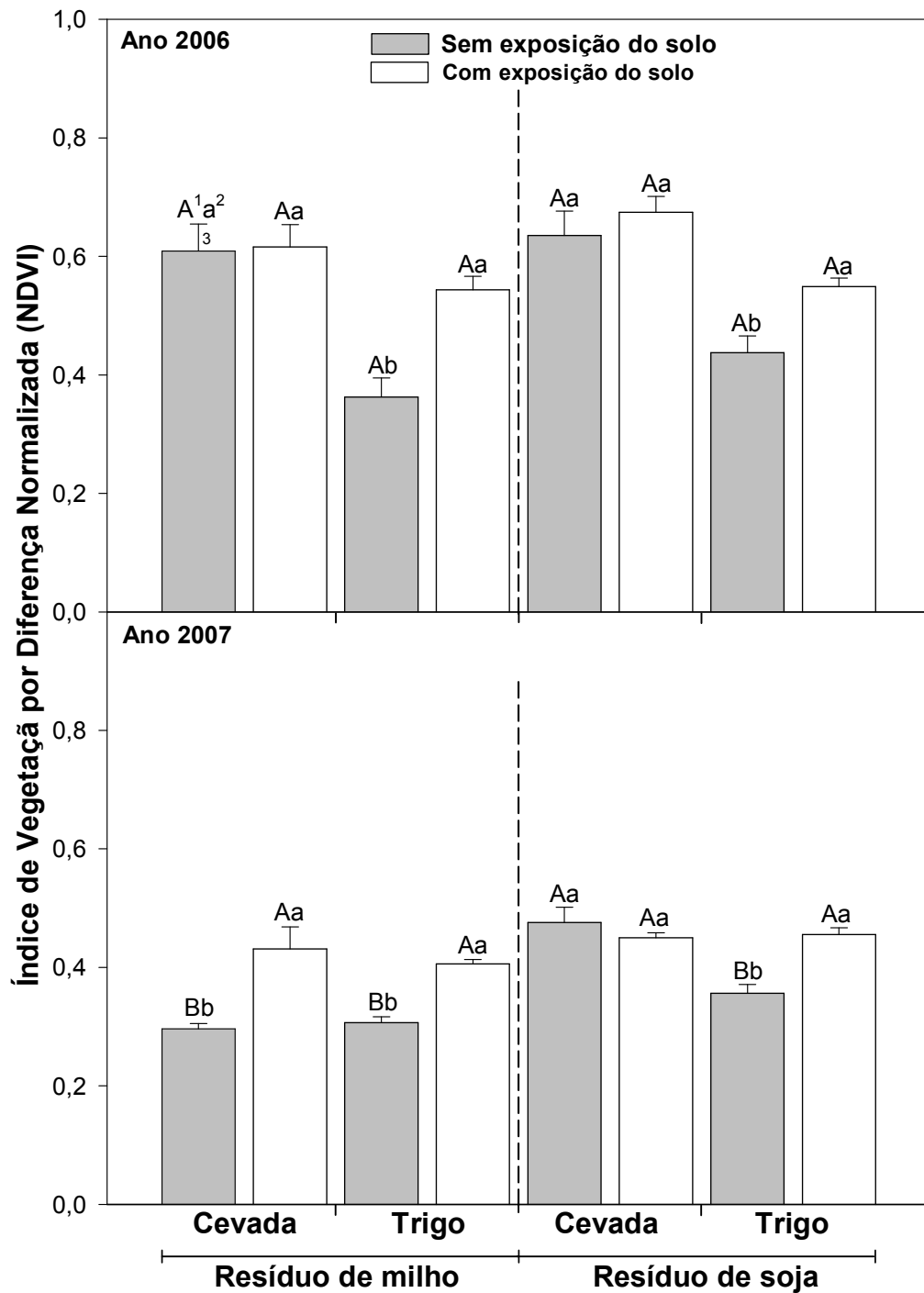
¹ Não existem diferenças significativas entre tratamentos pelo F-teste, à 5% de significância.

² Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para diferentes tipos de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

³ Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para o mesmo tipo de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁴ Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 13. Nitrogênio acumulado na parte aérea, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

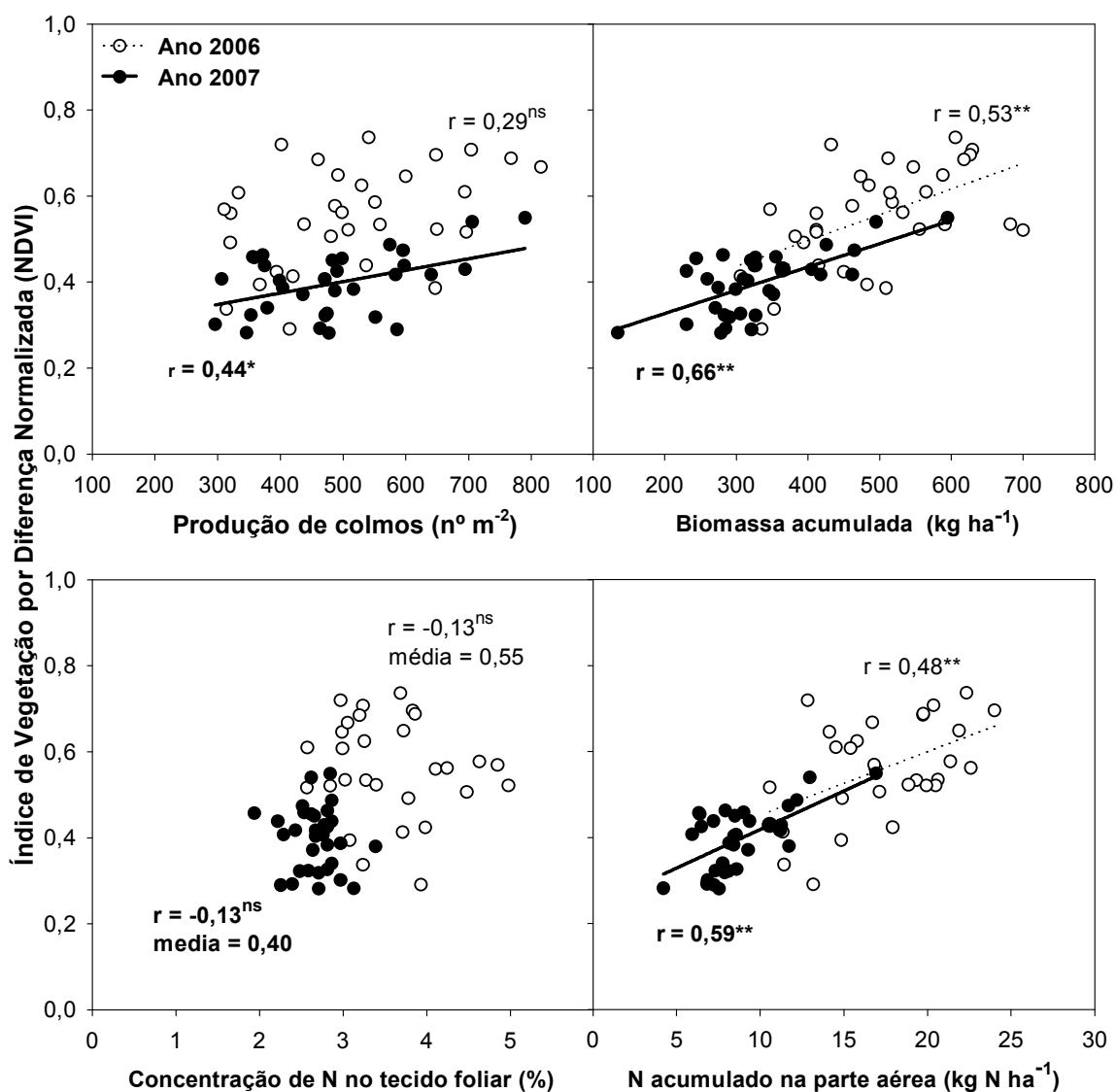


¹ Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para diferentes tipos de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

² Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para o mesmo tipo de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

³ Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 14. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.



* Correlação significativa entre as variáveis a 5% de probabilidade pelo t-teste.

** Correlação significativa entre as variáveis a 1% de probabilidade pelo t-teste.

FIGURA 15. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com as variáveis de planta por ocasião da emissão da sexta folha: número de colmos por m⁻², biomassa acumulada na parte aérea, concentração de N na parte aérea e N acumulado na parte aérea, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

Apesar dos autores testarem diversos índices vegetativos e outros canais espectrais, não obtiveram melhoria representativa nas correlações, atribuindo tal fato às estruturas celulares do parênquima paliçádico do dossel, caracterizadas por grandes espaços lacunosos. Nestes espaços, o infravermelho próximo é absorvido pela planta e é refratado entre as paredes celulares, até ser remetido para a atmosfera (Liu, 2006). Desta forma, Slaton *et al.* (2001), determinaram que nas condições favoráveis à maior quantidade de folhas (ou seja, maior biomassa) e materiais com maior espessura cuticular, haverá aumento da reflexão do infravermelho próximo.

Já o comprimento de onda do vermelho é indicador indireto da quantidade de moléculas de clorofilas presentes nos cloroplastos (Serrano *et al.*, 2000). Se ele não foi determinante na alteração do NDVI, ele pode ser considerado praticamente constante com o incremento da biomassa, pois há baixa variabilidade dos valores de N foliar. Yoder & Crosby (1995), estabeleceram que a concentração de N na planta não é um indicativo eficiente da condição nutricional, pois esta variável é influenciada pelo consumo de luxo da planta.

Por isso, optou-se por utilizar a biomassa acumulada, na parte aérea, como princípio da resposta do NDVI às condições nutricionais das plantas. A escolha foi baseada, na similaridade entre estas duas variáveis, por representar em diferentes tratamentos entre os anos e na alta associação entre elas. O incremento do nitrogênio não representou melhorias na correlação do NDVI com o N acumulado, além de esta variável ser menos eficiente do que a biomassa, em expressar os tratamentos aplicados no experimento.

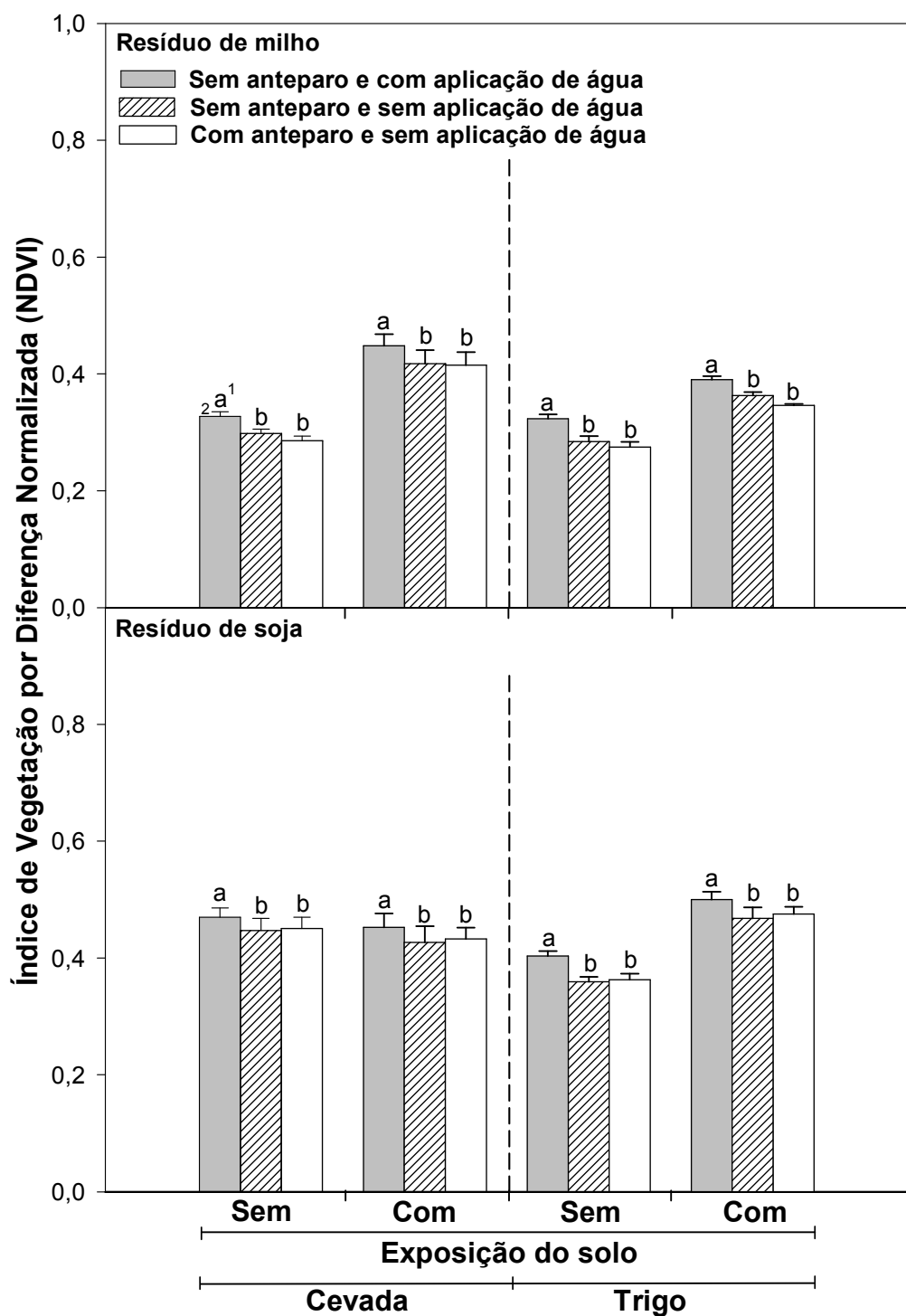
4.1.3. O efeito dos elementos meteorológicos

Os elementos meteorológicos, que podem modificar as leituras do sensor, foram avaliados no experimento da LINHA DE PESQUISA II, no ano de 2007. Estes elementos foram selecionados, buscando similaridade a situações que ocorrem em lavouras. Para tanto, foram realizados a campo duas análises: a) simulação do molhamento provocado por orvalho e/ou precipitação pluvial (aplicação de água) e sombra sobre o dossel (presença de anteparo) e b) flutuação diária do NDVI em função da modificação do ângulo de elevação solar.

Na primeira análise, foi comparado o NDVI nos tratamentos: a) “sem anteparo e com aplicação de água”; b) “sem anteparo e sem aplicação de água” e c) “com anteparo e sem aplicação de água” (Figura 16). A análise de variância dos dados encontra-se no Apêndice 11. A quantidade de água aplicada foi suficiente para proporcionar molhamento do dossel e da superfície de fundo, sem que houvesse saturação do solo. A água causou rápido aumento do NDVI, diferindo-se dos demais tratamentos (Figura 16).

Se consideradas as plantas, isoladas de qualquer efeito da superfície de fundo, aquelas com espaços intercelulares saturados com água, apresentam redução do NDVI, em decorrência do aumento da absorção da radiação em todos os comprimentos de onda do espectro luminoso (Ceccato, 2001).

No entanto, nas condições do experimento, a elevação do NDVI verificada, foi decorrente do efeito da água sobre a modificação das propriedades ópticas dos elementos da “superfície de fundo” e não sendo relevante nas plantas. Como já definido anteriormente, a “umidade da fração de solo agregada à palha”, apresenta íntima relação com o NDVI.



¹ Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre tratamentos, para o mesmo tipo de resíduo, cultura e exposição do solo, pelo teste de Tukey, à 5% de probabilidade.

² Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

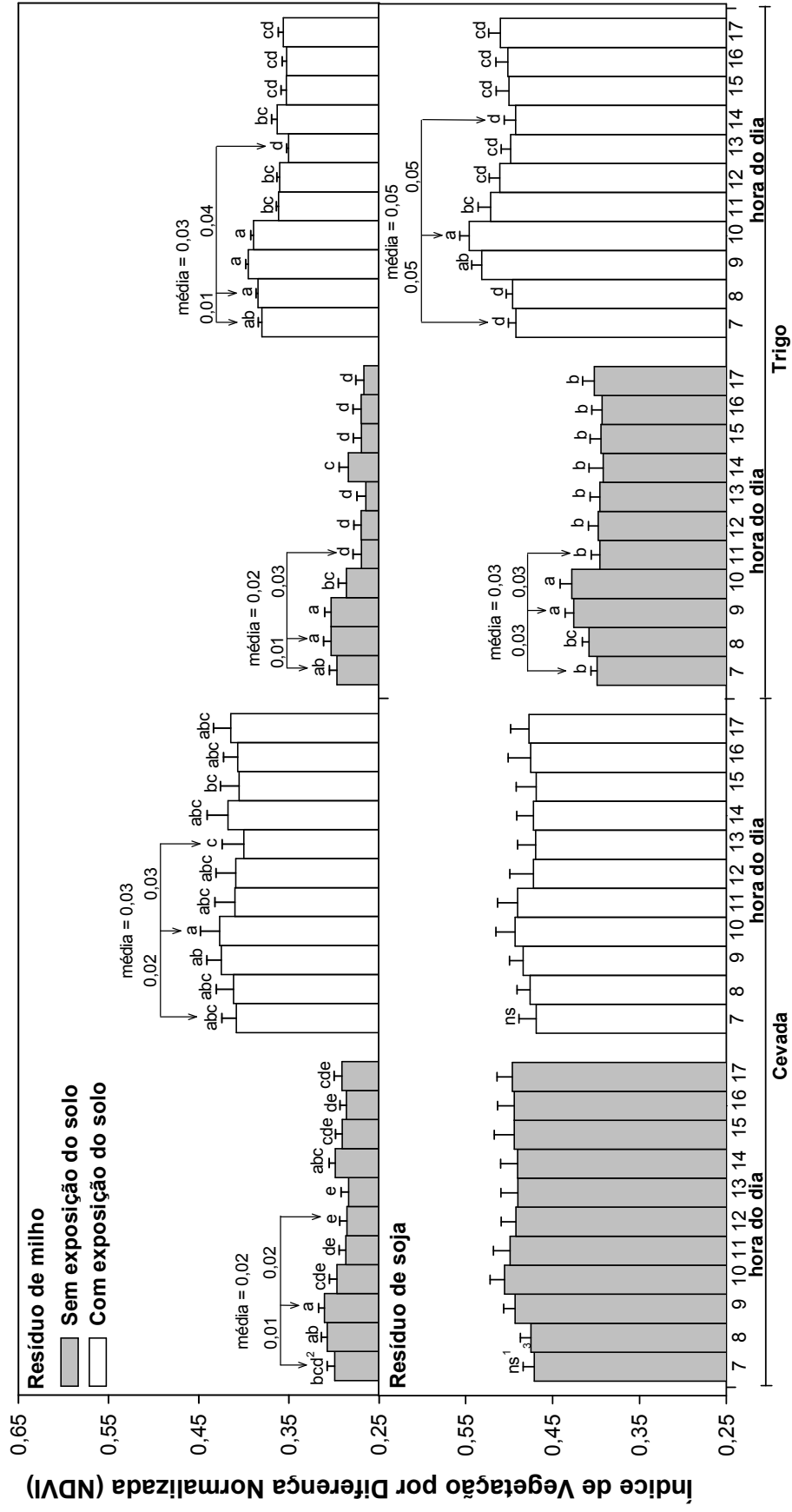
FIGURA 16. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), na emissão da sexta folha, em função da aplicação de água e formação de sobra sobre o dossel, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2007.

A aplicação de água determina a elevação do NDVI do solo e dos resíduos sobre ele (Daughy *et al.*, 2004). No experimento, este pressuposto foi confirmado, pois o NDVI aumentou entre 0,02 e 0,04 unidades em relação aos tratamentos sem aplicação de água (Figura 16).

A similaridade da modificação do NDVI, entre os tratamentos “sem anteparo e sem aplicação de água” e “com anteparo e sem aplicação de água” (Figura 16), confirma o princípio de desenvolvimento do aparelho. Por ser um sensor ativo, a taxa de emissão dos feixes luminosos é alta (1 foton a cada milissegundo) sob a forma de pulsos (10 Ghz) (NTech industries, 2008).

Desta forma, o efeito da modificação radiação incidente no momento do teste, com a formação de sombra sobre o dossel, não foi significativo, pois a radiação refletida por um alvo sob o fotodiodo pôde ser considerada o retorno de parte da própria radiação emitida pelo sensor.

A segunda análise correspondeu a avaliação do efeito da modificação do ângulo de elevação solar sobre as medições do NDVI. Este ângulo pode variar em função da hora do dia, estação do ano e latitude (Jackson *et al.*, 1979). A avaliação da flutuação diária da radiação solar global, entre 07:00 e 17:00 horas, foi realizada a cada hora (Figura 17) e a análise de variância dos dados encontra-se no Apêndice 12. Com exceção da cultivar MN 743, sob resíduo de soja, houve variação do NDVI ao longo das horas. De maneira geral, os valores mais altos foram atingidos entre 8:00 e 10:00 horas, sendo próximos aos encontrados na simulação anterior no tratamento com adição de água. Após este horário, os valores foram menores, mantendo-se similares entre si (Figura 17).



1 Não existem diferenças significativas entre tratamentos pelo F-teste, à 5% de significância.

2 Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre horas, para o mesmo tipo de resíduo, cultura e exposição do solo pelo teste de Tukey (P<0.05).

3 Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 17. Flutuação diária do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo e cevada. EEA/UFRGS, RS, 14/08/2007.

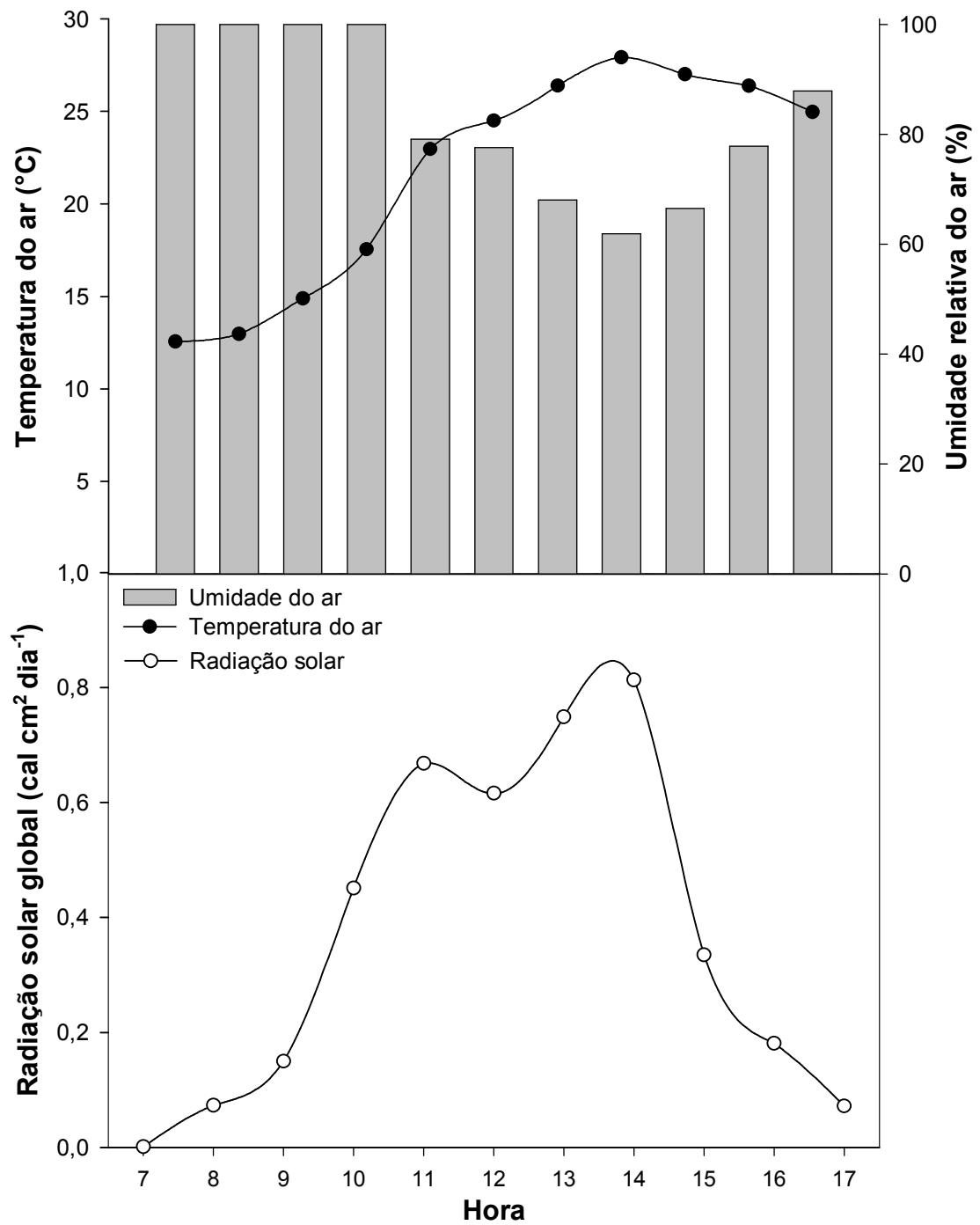


FIGURA 18. Temperatura média do ar, umidade relativa do ar e radiação solar global, entre 07:00 e 17:00 horas, no dia 14 de agosto. EEA/UFRGS, RS, 2007.

Estes resultados corroboram aos encontrados por Souza *et al.* (2004) que, trabalhando com milho, obtiveram valores de NDVI superiores às 08:00, sendo equivalentes aos obtidos às 18:00 horas, com o pico de mínimo valor às 14:00 horas. Os valores maiores, verificados nas primeiras horas da manhã, coincidiram com o início da incidência da radiação solar sobre o dossel (Figura 18). Jackson *et al.* (1979), avaliando dossel de trigo, determinaram valores baixos de reflectância para ângulos azimutais de 90° e 270° e baixos ângulos de elevação solar.

Nas primeiras horas da manhã, ocorre maior sombreamento das entrelinhas e uma melhor interação da radiação com o dossel (Jackson *et al.*, 1979). Esses autores também afirmaram que, na região do infravermelho próximo, o efeito do sombreamento não é tão pronunciado como na região do visível, devido ao múltiplo espalhamento e a baixa absorção, por pigmento, nesta faixa do espectro. Desta forma, gera-se o gradiente entre a maior resposta do infravermelho do que o vermelho, decorrendo em aumento do NDVI nas primeiras horas da manhã.

Apesar do fator relacionado ao ângulo de elevação solar, os maiores valores verificados nas primeiras horas da manhã, provavelmente ocorreram por influência da presença do orvalho. Tal conclusão decorre do experimento anterior em que foi a presença de água e não o sombreamento que definiram a modificação significativa do NDVI.

De forma geral, entre 11:00 e 12:00 horas, foi determinado o início da queda dos valores de NDVI (Figura 17), coincidindo com: o início da maior incidência da radiação solar, maiores temperaturas do ar e diminuição da umidade do ar (Figura 18). A intensidade da queda do NDVI foi dependente da presença ou não de resíduo (Figura 17). Segundo Oliveira *et al.* (2005) superfícies

sem cobertura registram menores valores de umidade, visto que a perda de água é facilitada pela maior exposição da superfície de evaporação e maior temperatura se comparadas à presença da cobertura vegetal.

Provavelmente, a interação entre o aumento do ângulo de elevação solar com o secamento da superfície de fundo, alterando suas propriedades ópticas, diminuiu os valores de NDVI ao longo do dia. Porém, o molhamento provocado pelo orvalho sobre a na superfície do fundo foi responsável, pela maior intensidade da diferença entre os valores máximos e mínimos de NDVI ao longo do dia.

O modelo de correção proposto na Tabela 3 foi incrementado em mais dois elementos que modificaram o NDVI com intensidade similar, gerando a Tabela 4. As leituras, realizadas após a ocorrência de molhamento da superfície de fundo e do dossel, apresentaram valores de NDVI similares às leituras realizadas nas primeiras horas da manhã (até as 10:00 horas). A relação, entre o máximo e mínimo NDVI, será utilizada para sua correção em função dos elementos meteorológicos. Nos tratamentos “com exposição do solo” a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi 0,03 para milho e 0,05 para soja. Já nos tratamentos “sem exposição do solo” esta diferença foi de 0,02 para milho e 0,03 para soja. Estes valores foram agregados à Tabela 3, formando o modelo final (Tabela 4).

TABELA 4. Modelo para correção do NDVI em função dos elementos que interferem nas leituras.

Exposição do solo sob o sensor	Tipo de resíduo	Valor de correção do NDVI			
		Umidade do solo (%)			Molhamento ²
		-1%	12,5	+1%	
Não	Milho	-0,01	0,19	+0,01	0,02
	Soja	-0,02	0,24	+0,02	0,03
Sim ¹	Milho	-0,02	0,25	+0,02	0,03
	Soja	-0,03	0,30	+0,03	0,05

¹ Corresponde a quantidade de resíduos menor que 2 t ha⁻¹.

² Corresponde ao molhamento do dossel e da superfície de fundo provocado por precipitação pluvial ou presença de orvalho.

4.2. Modelo para determinação das classes de potencial produtivo

O desenvolvimento do modelo, para estimativa do potencial produtivo, foi baseado na relação entre o NDVI com a biomassa acumulada na parte aérea, conforme determinado anteriormente. Moges *et al.* (2004), trabalhando em trigo com o sensor GreenSeeker, também consideraram esta variável altamente relacionada ao NDVI.

O modelo considerou o NDVI como variável dependente da biomassa, pois houve a necessidade de conhecer a máxima variabilidade do NDVI em função da máxima variabilidade da biomassa. Esta linha de condução foi aplicada por Phillips *et al.* (2004), com o número de afilhos por área em trigo, que o relacionaram ao NDVI obtido por fotografia multiespectral aérea. Porém, este método se diferencia dos tradicionais modelos de sensoriamento remoto, onde são comuns as equações de estimativa de crescimento das culturas em função da variação do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas (Liu, 2006).

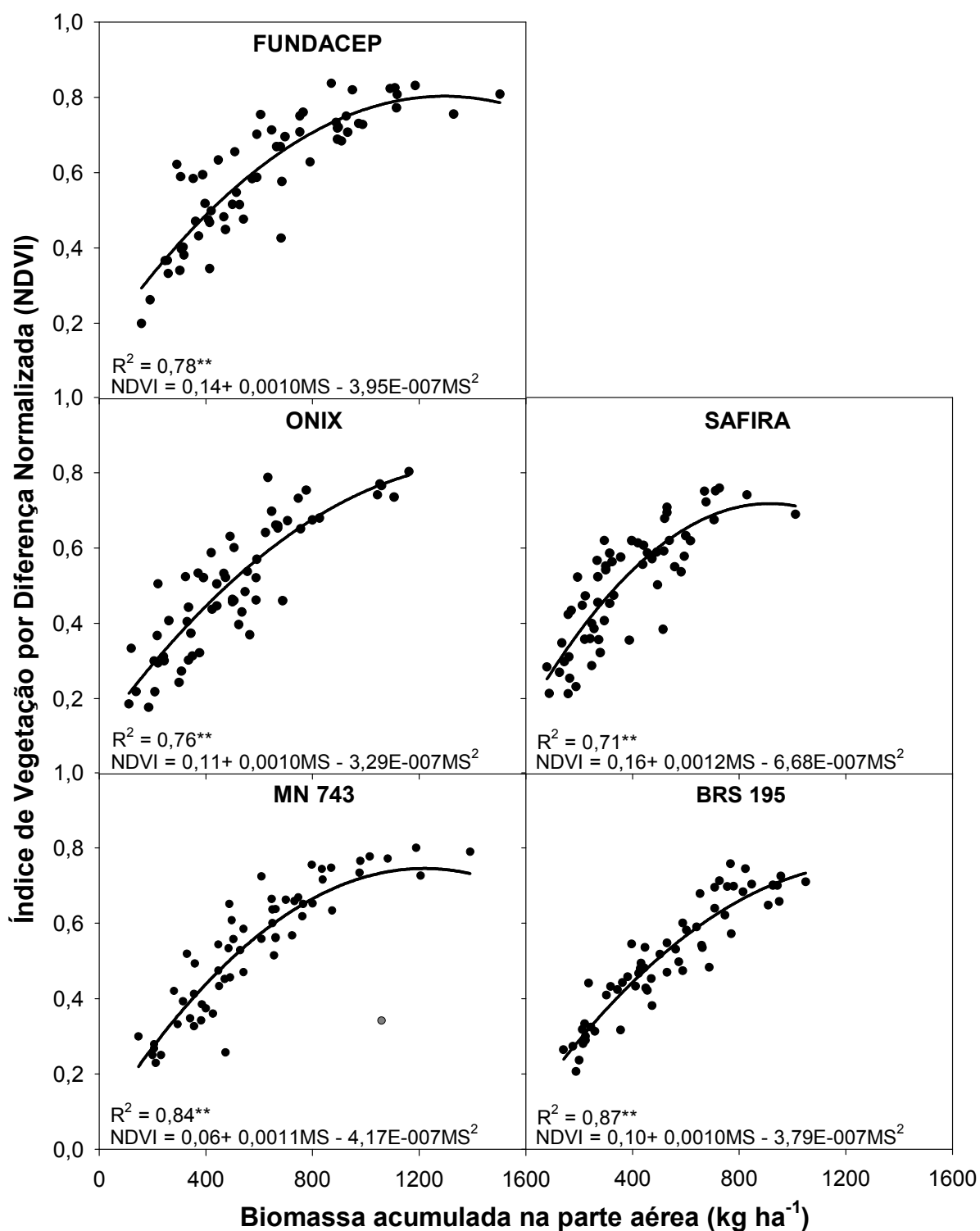
O modelo também objetivou a criação de classes de NDVI que indicassem, a partir do ajuste de função dos valores de biomassa, diferentes classes de potencial produtivo. Ao contrário dos métodos tradicionais em que a partir de uma

equação, entra-se com valores de NDVI e estima-se a variável de interesse. No método a ser aplicado, indicadores práticos serão gerados, para avaliação a campo, da condição nutricional da planta, baseados em zonas críticas e não há predição de valores absolutos. Araújo *et al.* (2005), criaram zonas de manejo a partir de videografia aérea, realizada no pré-florescimento de trigo e soja, visando relacionar com classes de rendimento de grãos.

A LINHA DE ESTUDO III, em 2006, foi a fonte de dados utilizada para o desenvolvimento deste modelo. A correção do NDVI não foi aplicada sobre os elementos da superfície de fundo, em virtude do grande número de parcelas utilizadas neste experimento nem sobre os elementos meteorológicos, porque as avaliações não ocorreram em situações que justificassem a aplicação desta.

A relação entre, a biomassa e o NDVI, foi determinada pela adequação de curvas de regressão (Figuras 19 e 20). O ajuste foi feito sobre uma regressão polinomial de 2º grau. Em trabalhos de sensoriamento remoto, é comum o uso de funções exponenciais para expressar a relação da variável indicadora com o NDVI (Braga, 1995), pois em situações com elevada variabilidade de valores, o ajuste exponencial é eficiente em detectar o patamar de máximos valores do NDVI (ponto de saturação) (Braga, 1995). Porém, quando o número de pontos amostrados com altos valores é baixo, este tipo de ajuste tende a não detectar o patamar, levando à linearidade. Por outro lado, a função quadrática força a determinação do ponto máximo do NDVI, o qual ocorre no momento em que muda o sentido da curva, sem prejuízos na manutenção da resposta esperada, até a ocorrência do valor de saturação, que é similar a curva exponencial.

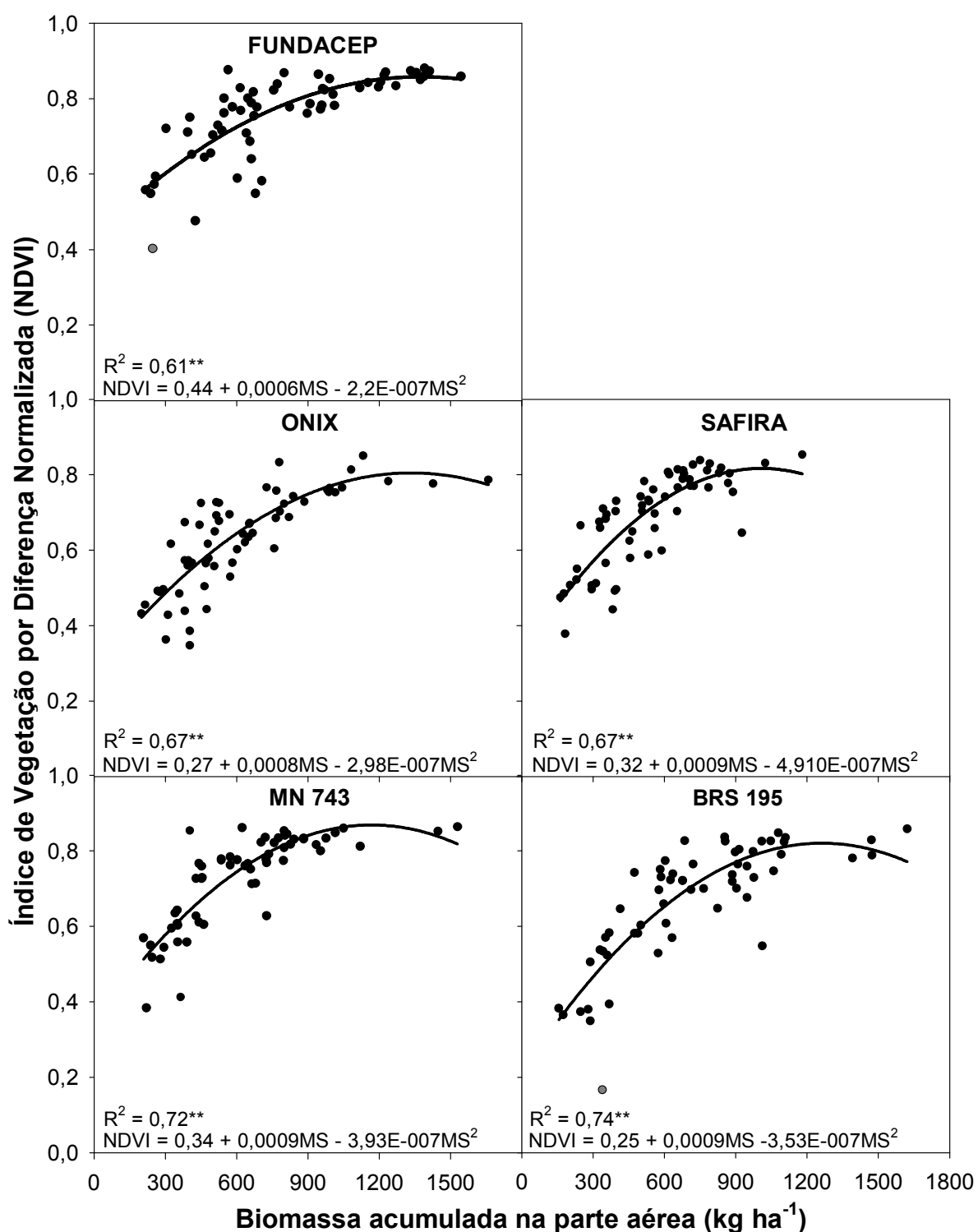
Ajustando a função quadrática, observa-se que os coeficientes de determinação foram altos e significativos (entre 0,7 e 0,8) para as cultivares de trigo e cevada, nos resíduos de milho (Figura 19) e de soja (Figura 20).



**Modelo de regressão significativo a 1% de probabilidade pelo F-teste.

○ Valores atípicos não considerados no ajuste do modelo.

FIGURA 19. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a biomassa acumulada da parte aérea, nas cinco cultivares de trigo e cevada, nos resíduos de milho. EEA/UFRGS, RS, 2006.



** Modelo de regressão significativo a 1% de probabilidade pelo F-teste.

● Valores atípicos não considerados no ajuste do modelo.

FIGURA 20. Correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a biomassa acumulada da parte aérea, nas cinco cultivares de trigo e cevada, nos resíduos de soja. EEA/UFRGS, RS, 2006.

As equações mostraram que o NDVI aumentou com o incremento da biomassa, até o valor de saturação do NDVI (Figuras 19 e 20), cujo máximo valor ocorreu na cultivar de cevada MN 743, sob resíduo de soja (0,87). Este valor é muito próximo ao considerado máximo por Liu (2006), que é 0,84.

Após o valor de saturação do NDVI, em algumas cultivares, houve queda da tendência estabelecida pela regressão. Tal fato é esperado por ser um ajuste quadrático, e permite que, mesmo nas cultivares em que se obteve baixa variabilidade de biomassa, seja possível atingir o valor de saturação, o que não seria obtido pela função exponencial.

As características agronômicas das cultivares (Tabela 2), em interação com a superfície de fundo, foram expressas pelo NDVI até o valor de saturação (Figuras 19 e 20). Este resultado corrobora com Sembirig *et al.* (2000), que utilizando o GreenSeeker, em trigo, determinaram que em situação de dossel incompleto, existe elevada interação entre o NDVI e os elementos da superfície de fundo. Já por ocasião da saturação do NDVI houve situações de alta biomassa, nas quais o NDVI ainda foi minimamente afetado pela superfície de fundo. Desta forma, cria-se a pressuposição de que, existindo diferenças relevantes entre cultivares, o modelo de estimativa de potencial produtivo deverá ser específico por grupo de cultivares.

Desta forma, sobre as regressões foram definidos quatro “valores críticos” de NDVI: mínimo, baixo, médio e máximo. Cada um destes foi indicador de um valor crítico de biomassa e, o conjunto de observações entre os valores críticos corresponderam a uma classe de potencial produtivo (baixo, médio, alto e muito alto). Estes valores e as classes de potencial produtivo estão representados na Figura 21 e descritos imediatamente abaixo.

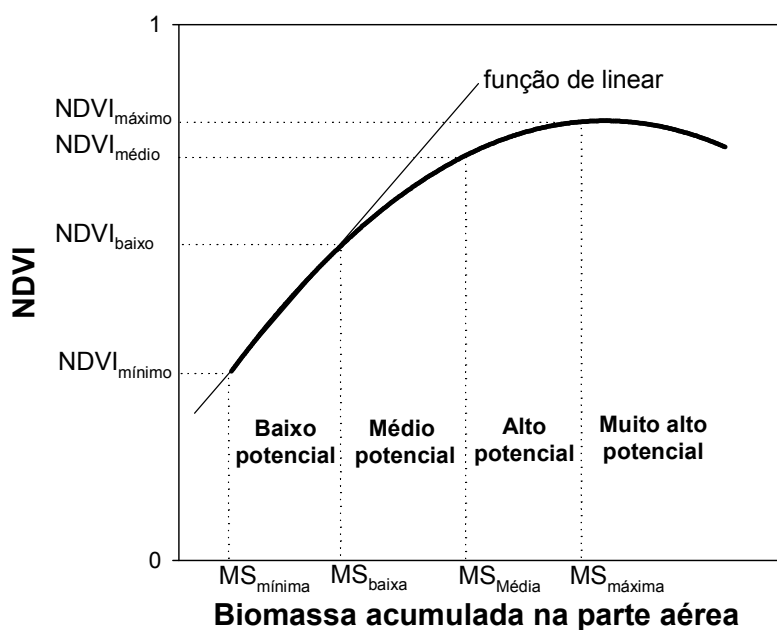


FIGURA 21. Modelo teórico para determinação dos valores críticos de NDVI e biomassa acumulada na parte aérea e das classes de potencial produtivo.

$NDVI_{mínimo}$: valor mínimo de biomassa obtido, não considerando eventuais valores atípicos. Representa o ponto inicial do baixo potencial produtivo;

$NDVI_{baixo}$: valor máximo, na qual a regressão polinomial perde seu sentido de crescimento linear. Representa o valor da divisão entre o potencial produtivo baixo e médio;

$NDVI_{médio}$: valor médio entre os pontos determinados pelo $NDVI_{baixo}$ e $NDVI_{máximo}$. Representa o valor de divisão entre o potencial produtivo médio e alto;

$NDVI_{máximo}$: primeiro valor, no qual a regressão inicia seu patamar de valores constantes (inclinação é zero). Representa o valor de divisão entre o potencial produtivo alto e muito alto.

Os quatro valores críticos de NDVI e biomassa, separados de acordo com as quatro classes de potencial produtivo, foram testados estatisticamente (Tabela 5). O NDVI e a biomassa diferenciaram-se entre tipo de resíduo e cultivares.

TABELA 5. Valor máximo e mínimo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e biomassa acumulada na parte aérea (valores críticos), obtidos a partir das regressões apresentadas nas Figuras 19 e 20, nas cinco cultivares, nos resíduos de milho e soja. EEA/UFRGS, RS, 2006.

Cultivar	NDVI		Biomassa acumulada	
	Resíduo de milho	Resíduo de soja	Resíduo de milho	Resíduo de soja
----- Baixo potencial -----				
	----- (NDVI _{mínimo} ±NDVI _{baixo}) -----		----- (MS _{mínima} ±MS _{baixa}) -----	
Fundacep	(0,29±0,45) ¹ B ² a ³	(0,56±0,67) Aa	(159±348) Ba	(218±467) Aa
Ônix	(0,21±0,44) Bbc	(0,42±0,55) Ac	(112±394) Aa	(200±415) Aab
Safira	(0,25±0,44) Bab	(0,47±0,58) Abc	(79±273) Bb	(162±319) Ac
MN 743	(0,22±0,39) Bc	(0,51±0,61) Ab	(147±339) Aa	(209±351) Aabc
BRS 195	(0,24±0,42) Bbc	(0,38±0,53) Ac	(141±373) Aa	(156±372) Abc
----- Médio potencial -----				
	----- (NDVI _{baixo} ±NDVI _{médio}) -----		----- (MS _{baixa} ±MS _{média}) -----	
Fundacep	(0,46±0,67) Bab	(0,68±0,79) Aa	(357±718) Bb	(476±841) Aa
Ônix	(0,45±0,69) Ba	(0,56±0,70) Ab	(401±845) Aa	(425±748) Aab
Safira	(0,45±0,62) Babc	(0,59±0,73) Ab	(280±536) Ac	(326±599) Ac
MN 743	(0,40±0,64) Bc	(0,62±0,80) Aa	(347±723) Ab	(359±758) Ab
BRS 195	(0,43±0,63) Bbc	(0,54±0,71) Ab	(379±739) Ab	(382±726) Ab
----- Alto potencial -----				
	----- (NDVI _{médio} ±NDVI _{máximo}) -----		----- (MS _{média} ±MS _{máxima}) -----	
Fundacep	(0,68±0,80) Bab	(0,8±0,86) Ab	(727±1160) Ba	(850±1268) Ab
Ônix	(0,70±0,79) Aa	(0,71±0,8) Ad	(852±1169) Aa	(758±1159) Ac
Safira	(0,63±0,72) Bd	(0,74±0,82) Ac	(542±849) Ab	(606±954) Ad
MN 743	(0,65±0,79) Bb	(0,81±0,87) Aa	(732±1207) Ba	(767±1529) Aa
BRS 195	(0,64±0,76) Bc	(0,72±0,82) Acd	(745±1202) Aa	(736±1188) Ac

¹ Refere-se aos valores críticos que definem o início e o fim da classe de potencial produtivo para a cultivar.

² Letras maiúsculas iguais na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

³ Letras minúsculas iguais na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Este resultado corrobora com Jackson & Pinter Jr. (1986) que encontraram maiores valores de reflectância nos dosséis de trigo planófilos do que nos erectófilos, pois estes últimos permitem maior interação do dossel com os elementos da superfície de fundo. Também, Moreira *et al.* (2005) observaram que genótipos de trigo com maior acúmulo de biomassa são os mais eficientes no aproveitamento da radiação incidente. Por este foco, o modelo criado seria inviável de, futuramente, ser utilizado, pois a estimativa do potencial produtivo seria específica por cultivar.

O passo seguinte foi verificar se o potencial produtivo, determinado pelo incremento da biomassa em função do NDVI, é ou não diferente entre cultivares. Ajustando-se a função quadrática sobre a relação determinada apenas pelos valores críticos de NDVI e biomassa para cada cultivar (Tabela 5), obteve-se uma equação geral (Figura 22.1).

O aumento do NDVI sobrepõe-se às diferenças entre cultivares, em função do incremento da biomassa, tanto sob resíduo de milho como de soja (Figura 22.1). Este fato prova a validade da utilização do sensor GreenSeeker em diferentes cultivares, mesmo que tenham diferentes características agrônômicas. A mesma conclusão foi obtida por Raun *et al.* (2001), que determinaram que o incremento do potencial produtivo, estimado a partir da leitura de NDVI, no momento das aplicações de nitrogênio, era maior que a variabilidade entre os ensaios para uma mesma leitura.

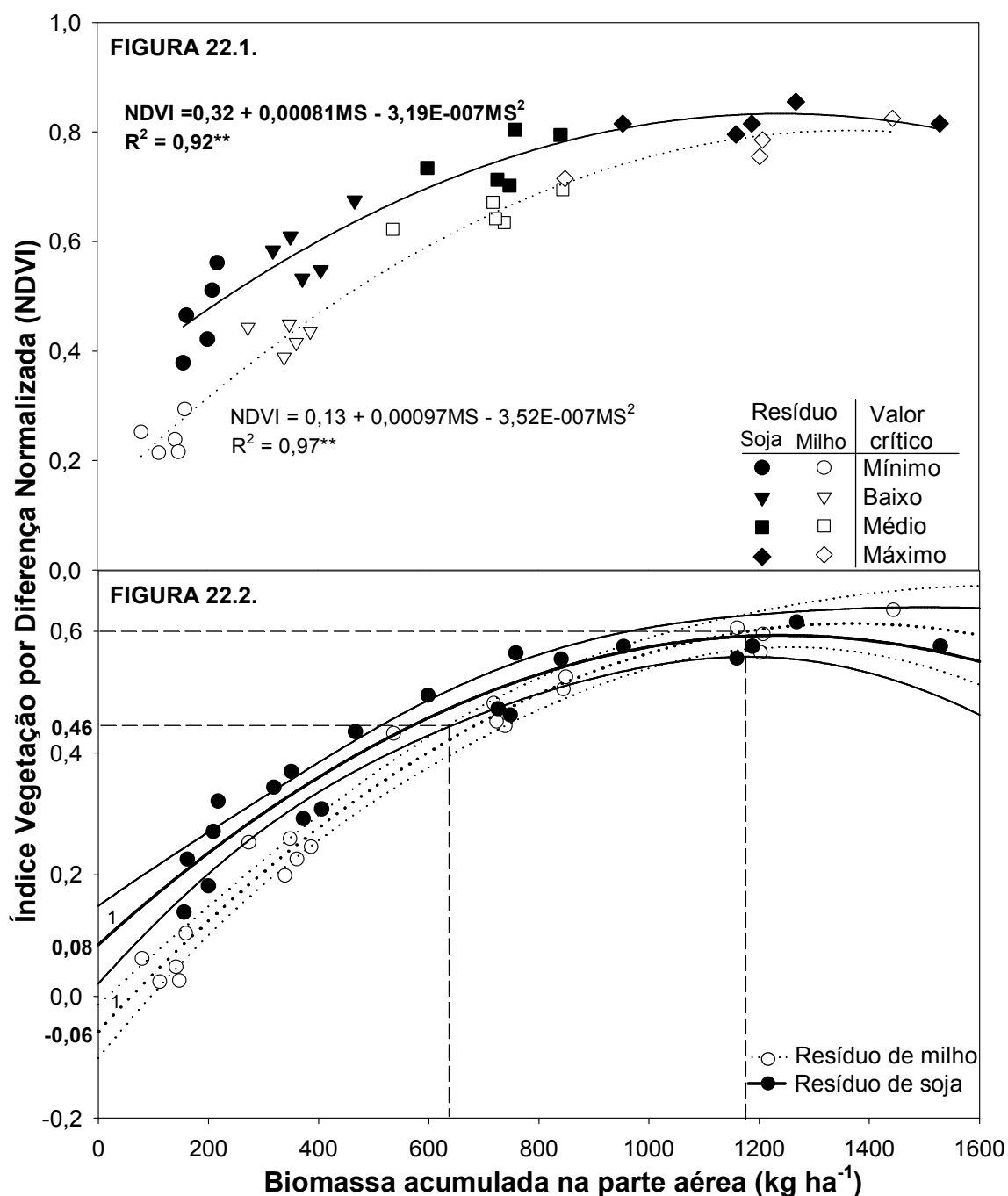
Outro aspecto importante foi verificar a possibilidade de unificar, num modelo comum, os resíduos de milho e soja. Para tanto, foi corrigido o efeito do fundo e comparadas às curvas de regressão. Dos valores de NDVI que determinam as curvas observadas na Figura 22.1, subtraiu-se os valores de NDVI segundo a Tabela 4, obtendo-se as curvas mostradas na Figura 22.2, ajustadas

sobre os valores de NDVI corrigidos. A correção considerou a situação de “solo não exposto”, na umidade do solo referência e sem molhamento (valores de 0,19 e 0,24, respectivamente, para o resíduo de milho e soja).

Desta forma, na Figura 22.2 observa-se que, após a correção do NDVI, o ponto de origem das equações nos dois resíduos não foi igual a zero, como seria esperado, visto que na situação de biomassa igual a zero teoricamente deveria haver apenas o efeito da superfície de fundo, pois os valores deveriam ser 0,19 e 0,24, respectivamente, para o resíduo de milho e soja. Porém, na subtração entre os valores da Figura 22.1, para biomassa igual a zero (origem dos pontos), com os da Tabela 4 obteve-se para milho -0,06 e 0,08 para soja. Tal condição decorreu da variabilidade da umidade do solo e/ou quantidade de resíduos, sob o fotodiodo do sensor, em cada unidade experimental.

Na Figura 22.2, a comparação entre os intervalos de confiança à 95% de certeza, também permitiu quantificar o grau de similaridade entre as duas curvas (milho e soja). Não houve sobreposição entre intervalos e, portanto, similaridade até o valor de NDVI 0,46. Outro aspecto é que a partir e após 0,61, as regressões alteraram seu sentido conforme o incremento da biomassa, de forma que: sob resíduo de milho houve a tendência à linearidade e; sob soja, queda do NDVI.

Portanto, confirma-se que a resposta do NDVI em função da biomassa, foi específica por tipo de resíduo. Este fato, também foi verificado por Wamser, (2002) e Poletto, (2004), com outras variáveis indicadoras, sendo considerado intrínseco ao efeito das relações de imobilização e liberação do N nos solos, que alteram a resposta das plantas ao N, nestes resíduos. Tradicionalmente, em resíduo de milho as plantas respondem de maneira linear ao incremento da fertilidade e em soja de forma quadrática.



**Modelo de regressão significativo a 1% de probabilidade pelo F-teste.

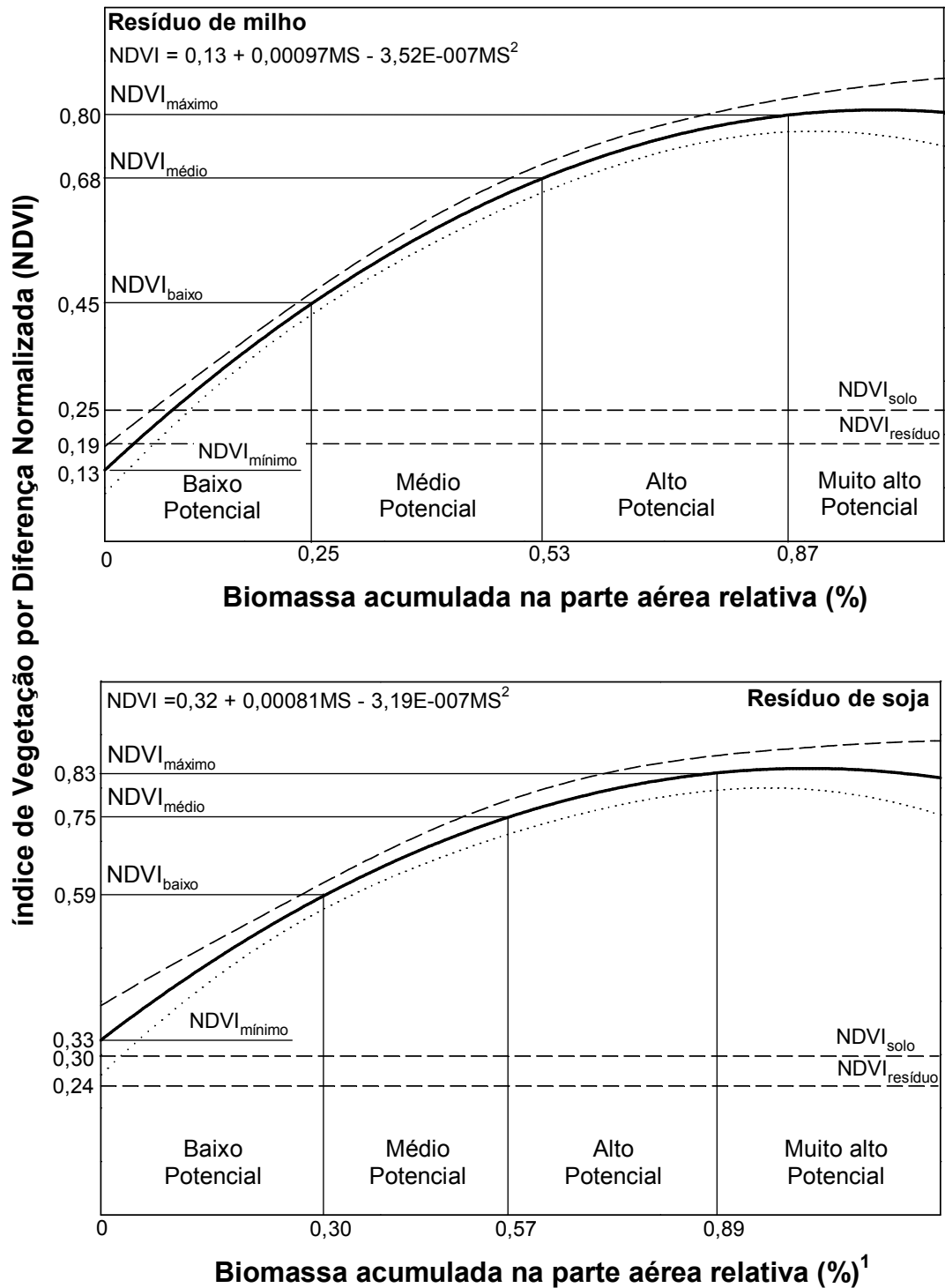
¹ Regressões obtidas após a correção dos elementos da superfície de fundo sobre as regressões ajustadas na FIGURA 22.1.

FIGURA 22. Regressão polinomial ajustada sobre os valores críticos das cinco cultivares testadas (FIGURA 22.1) para cada resíduo e comparação entre as equações geradas através do intervalo de confiança à 95% de certeza (FIGURA 22.2). EEA/UFRGS, RS, 2006.

O modelo final, para determinação das classes de potencial produtivo (chamado normal), é mostrado graficamente na Figura 23, com os valores numéricos presentes no Apêndice 13. No modelo constam as equações já ajustadas na Figura 22.1 e as classes de potencial produtivo expressas pelos valores críticos de NDVI e biomassa. Porém, a biomassa foi transformada em termos relativos, para que a interpretação dos valores seja em termos de potencial produtivo em relação ao máximo possível (1500 kg ha^{-1}) (Tabela 5).

O intervalo de confiança a 95%, do modelo normal, foi chamado “**modelos sub e superestimados**” (Figura 23 e Apêndice 13). A finalidade destes foi permitir o uso do sensor em lavouras que não apresentem condições de variabilidade semelhantes ao empregado neste experimento. Por exemplo, o modelo superestimado pode ser adequado para lavouras amostradas posteriormente à emissão da sexta folha, quando apresentam menor variabilidade de biomassa. Já o modelo subestimado poderia ser adequado para lavouras amostradas antes do momento ideal, quando a variabilidade da biomassa é máxima. Estes princípios foram considerados por Mullen *et al.* (2003), que propuseram o uso do sensor GreenSeeker, nos momentos de pré e pós-período recomendado de uso do N.

Nos modelos normal, sub e superestimado evidencia-se uma zona, onde há mistura dos fatores determinantes do NDVI. Os valores de NDVI que representam a mínima presença de plantas na área, para o modelo normal, sub e superestimado, são respectivamente: 0,14, 0,10 e 0,19 sob resíduo de milho e 0,34, 0,27 e 0,39 para soja (Figura 23 e Apêndice 13). Desta forma, a mínima presença de plantas poderá ser sobreposta pela interferência dos elementos da superfície de fundo.



¹ refere-se a divisão de cada observação pela máxima biomassa obtida entre todas as cultivares (1500 kg ha^{-1})

² a regressão polinomial e o seu intervalo e confiança correspondem aos seguintes modelos:
 ----- superestimado
 ————— normal
 subestimado

FIGURA 23. Modelo para determinação do potencial produtivo de trigo e cevada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), nos resíduos de milho e soja, por ocasião da emissão da sexta folha. EEA/UFRGS, RS, 2006.

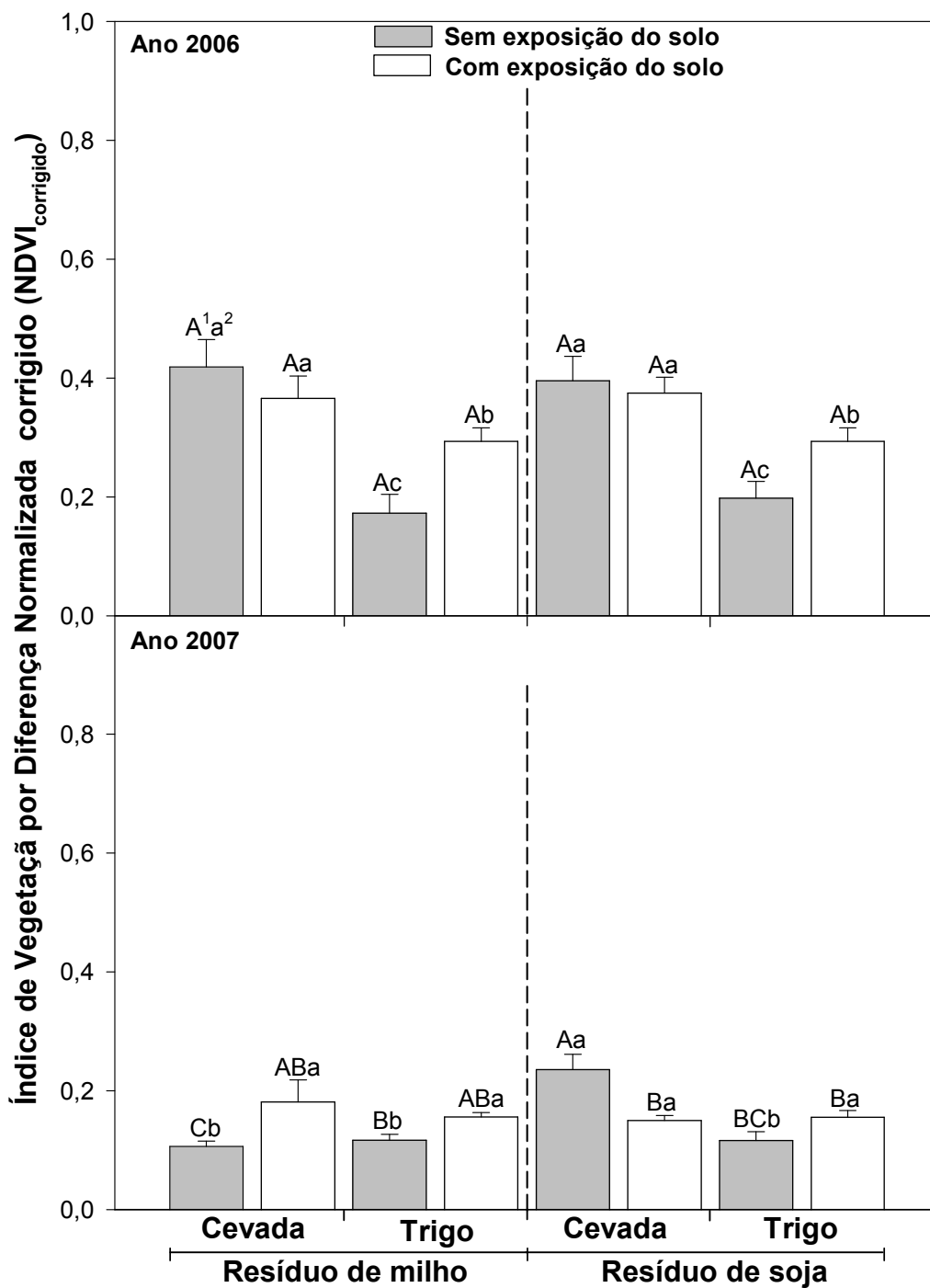
A mesma situação foi encontrada por Flowers *et al.* (2003), em trigo, que obtiveram elevada variabilidade da reflectância do dossel sob condições de baixa presença de plantas em um modelo para predição de afixos. Como alternativa para correção desta limitação, Jorgensen & Jorgensen, (2007) sugerem que quando constatados valores atípicos torna-se necessária a confirmação visual da sua causa. Porém, por meio do modelo desenvolvido, qualquer que seja a causa dos baixos valores, o potencial produtivo sempre será baixo.

O modelo desenvolvido acima (Figura 23 e Apêndice 13) tem como vantagem sua simplicidade de uso, quando por ocasião da utilização do sensor à campo. Para qualquer medida de NDVI obtida na lavoura, esta poderá ser comparada segundo as classes de potencial produtivo do modelo, para a resteva em questão. Desta forma, rapidamente o operador terá a informação sobre o status nutricional da planta naquele intervalo de espaço quantificado.

4.3. Validação dos modelos

4.3.1. Validação do modelo de correção do NDVI

A validação do modelo proposto (Tabela 4) foi realizada sobre os dados da LINHA DE ESTUDO II, nos anos de 2006 e 2007. A correção do NDVI foi apenas com relação aos elementos da superfície de fundo, visto que as avaliações foram efetuadas após as 10:00 horas, não justificando a correção dos elementos meteorológicos. Enfatiza-se que há duas bases de dados: uma para o desenvolvimento do modelo e outra para sua validação. A partir da subtração do NDVI nestes ensaios (Figura 14), pelos valores contidos na Tabela 4, obtiveram-se os valores de NDVI da Figura 24.



¹ Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para diferentes tipos de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

² Médias seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre culturas e exposição do solo, para o mesmo tipo de resíduo, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

³ Barras verticais sobre colunas representam o erro-padrão da média.

FIGURA 24. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) corrigido em função dos elementos da superfície de fundo, na emissão da sexta folha, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

A correção se deu pela subtração dos valores de NDVI da Figura 24 pelos valores de NDVI da Tabela 4, correspondente à umidade referência. Desta forma, na comparação entre as Figuras 14 e 24, observa-se que, para ambos os casos houve interação entre os tratamentos (nos dois anos). Porém, na Figura 24, o NDVI corrigido apresentou maior significância entre os tratamentos, tendo maior número de comparações entre as médias. Desta forma, este NDVI estabeleceu diferenças não expressas pelo NDVI não corrigido (Figura 14), evidenciando sua melhor eficiência em quantificar a condição nutricional do dossel.

A validação do modelo de correção do NDVI confirma sua eficiência em condições de brusca alteração dos fatores da superfície do fundo. De maneira geral, a aplicação deste modelo é justificada quando ocorrerem alguma das seguintes condições em áreas de lavouras: a) falhas na distribuição da população de plantas (alternância das condições “com e sem presença de plantas”); b) falhas na distribuição dos resíduos sobre o solo (alternância das condições “com e sem exposição de solo”); c) modificação dos tipos de resíduos (alternância das condições “resíduos de milho e soja”).

Quanto aos elementos meteorológicos, as considerações são baseadas apenas nos ensaios anteriores, sendo necessária sua validação a campo no futuro. Porém, algumas condições mostraram-se aptas a sua utilização, como: a) avaliações iniciadas sob condição de molhamento do dossel e solo provocado por orvalho e continuadas após o secamento; b) avaliações iniciadas antes de precipitação pluvial e continuadas após, quando ainda há molhamento do dossel; c) alteração brusca de umidade do solo ao longo da área (como em várzeas ou solos hidromórficos).

Verificada alguma destas condições de interferência sobre o real NDVI do dossel, em uma área da lavoura levantada, utilizar-se-á os valores da Tabela 4

para serem subtraídos dos valores de NDVI obtidos na área em questão. Após a correção, os novos valores de NDVI poderão possivelmente ser comparados a outras medições da lavoura na qual não houve a presença das condições levantadas acima.

Em lavouras, nas quais existe apenas um tipo de resíduo, homoganeamente distribuído, sem que haja exposição do solo, com umidade de trabalho contida na faixa de referência e sem molhamento relevante do dossel e da superfície de fundo, o uso do modelo de correção do NDVI não se justifica. Neste caso, a variabilidade dos valores de NDVI será devida, prioritariamente, a características do dossel.

4.3.2. Validação do modelo para determinação do potencial produtivo

O modelo gerado a partir da LINHA DE ESTUDO III na EEA/UFRGS em 2006, sob resíduo de soja (Figura 23), foi testado em uma lavoura de trigo no município de Victor Graeff (RS) (LINHA DE ESTUDO IV). A expectativa do modelo é que: o NDVI expressa a produção de biomassa na sexta folha e sua variabilidade espacial; a classificação do NDVI seja similar à classificação do potencial produtivo (biomassa) (Figura 23 e Apêndice 13) e se obtenha relação do NDVI com o rendimento de grãos.

Os dados de NDVI amostrados não foram corrigidos, pois foi considerado que houve ausência dos elementos que interferem nas leituras do NDVI do dossel (Tabela 4). As determinações foram realizadas quando o molhamento devido a presença do orvalho não era mais verificado. Além disso, a distribuição da resteva de soja na área amostrada foi uniforme.

O procedimento inicial na validação do modelo na lavoura foi a transformação dos valores absolutos de biomassa e rendimento de grãos para

valores relativos. Este artifício foi conveniente para comparar os valores de NDVI (que não foram transformados em relativos) com a biomassa e o rendimento de grãos, visto apresentarem unidades diferentes. Para tanto, os valores absolutos máximos da amostragem, para biomassa e rendimento de grãos, foram considerados como 1, e os demais uma proporção destes. Na Tabela 6, está colocada a média dos valores de biomassa e rendimento para cada classe de potencial produtivo em termos absolutos e relativos.

A biomassa e o rendimento relativos apresentaram as maiores frequências de ocorrência de valores (n) nas classes de potencial produtivo “médio” e “alto”, sendo que, nas classes “baixo” e “muito alto”, por ocorrerem poucos valores, estes foram considerados “valores atípicos” (Tabela 6). Os valores de NDVI foram ajustados segundo as três opções de modelo (subestimado, normal e superestimado) (Figura 23 e Apêndice 13). Nos três ajustes, novamente, nas classes “médio” e “alto” potencial, os valores ocorreram com maior frequência, havendo no modelo superestimado a distribuição mais equilibrada entre estas classes. Esta análise, por si só, já é suficiente em confirmar que as classes de NDVI, geradas pelo modelo (Figura 23 e Apêndice 13), são eficientes em expressar as classes de potencial produtivo, tanto por ocasião da emissão da sexta folha como no momento da colheita. Raun *et al.* (2005) valeram-se de relação semelhante para compor seu modelo de predição de doses nitrogenadas, a partir da relação direta do NDVI com o rendimento de grãos.

Desta forma, independente da distribuição da variabilidade espacial do NDVI, da biomassa e do rendimento de grãos na área da lavoura, a primeira conclusão, para tomada de decisão no manejo nitrogenado, seria recomendação de doses de N baixas, pois o potencial produtivo da cultura nesta área já está elevado (classes “médio” e “alto” potencial).

TABELA 6. Frequência de ocorrência (%) e média dos valores de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para os três tipos de modelos e valores médios absolutos e relativos dentro de cada classe de potencial das variáveis: biomassa acumulada da parte aérea e rendimento de grãos, nas quatro classes de potencial produtivo determinadas na área da lavoura. Victor Graeff, RS, 2006.

Classe de potencial produtivo ¹	Biomassa ²		Rendimento de grãos ³				NDVI				
	Absoluta	Relativa	%	Absoluto	Relativo	%	Sub estimado	Normal	%	Super estimado	%
Baixo	784	0,29	1	1609	0,29	4	-	0	-	0	0
Médio	1378	0,50	54	2671	0,48	56	0,67	3	0,72	10	0,76
Alto	1873	0,68	42	3652	0,65	38	0,78	59	0,80	86	0,81
Muito alto	2584	0,94	3	5390	0,96	2	0,82	38	0,84	4	-

¹ Classificação segundo o modelo proposto para lavouras sobre resíduo de soja (Figura 23 e Apêndice 13).

² O máximo relativo (=1) da biomassa na lavoura refere-se ao valor absoluto de 2588 kg ha⁻¹.

³ O máximo relativo (=1) do rendimento de grãos na lavoura refere-se ao valor absoluto de 5602 kg ha⁻¹.

Ehlert *et al.* (2004), analisando a variabilidade espacial da biomassa em lavoura de trigo, não obtiveram respostas significativas do rendimento de grãos às altas doses de nitrogênio, quando as plantas apresentavam alto acúmulo de biomassa por ocasião da aplicação do N.

O pressuposto de que o potencial produtivo da lavoura varia entre “médio” e “alto” e não há “alta resposta” ao N aplicado, poderá ser verificado nesta lavoura, mesmo não sendo conhecido o tratamento nitrogenado utilizado pelo produtor após a obtenção dos dados de NDVI. Porém, esta resposta poderá estar associada a outros fatores causadores de variabilidade espacial e temporal, de forma que, apenas estudos futuros e mais refinados podem afirmar com certeza se esta resposta é devida apenas a modificação espacial do nitrogênio ou associado a outros fatores de ambiente.

Nesta análise introduz-se o conceito de resposta ao N pelas plantas. Este conceito foi revisado por Raun & Johnson (1999) e é uma maneira indireta de estabelecer o grau de resposta da cultura ao N aplicado ou, a outros fatores que interferem nesta resposta.

Segundo os autores, a avaliação para determinar a resposta das plantas ao N disponibilizado faz-se a diferença entre a biomassa relativa atingida até a emissão da sexta folha, antes da aplicação do N em cobertura, e o rendimento de grãos relativo. Se a diferença é positiva (biomassa superior ao rendimento) indica que a resposta ao N foi baixa, não ocorrendo o aproveitamento pleno pela planta da dose aplicada. Já a diferença nula ou negativa (biomassa igual ou menor que rendimento) indica que a resposta ao N aplicado foi alta.

Nesta validação, este foi o método utilizado para verificar se o modelo tem a capacidade de expressar a resposta das plantas frente o potencial produtivo estimado na sexta folha e não a única e exclusivamente a resposta das plantas ao

N aplicado. Pois, não se têm a certeza de que a causa da resposta entre a emissão da sexta folha e a colheita de grãos é devida apenas a variação do N disponível na área. Segundo Machado (2002), a variabilidade espacial do rendimento de grãos em lavouras é determinada pela interação entre inúmeros fatores abióticos e bióticos, sendo o nitrogênio, apenas um deles. Porém, Jorgensen & Jorgensen (2007), afirmam que dentre os diversos fatores que determinam a variabilidade do rendimento em lavouras, a flutuação espacial dos teores de N mineral do solo estão dentre as causas mais fortes, pois são determinantes na formação dos componentes de rendimento das culturas. Portanto, neste trabalho duas classes foram utilizadas para indicar a resposta dos diferentes potenciais produtivos da lavoura da cultura frente aos fatores do ambiente: “alta resposta” e “baixa resposta”.

Portanto, continuando a validação do modelo foi analisada: a variabilidade espacial do NDVI, biomassa, rendimento de grãos e diferença relativa. No caso do NDVI, foi necessário optar por um dos modelos de determinação do potencial produtivo (subestimado, normal ou superestimado) para comparação com as classes da biomassa, do rendimento de grãos e da diferença relativa.

As condições da lavoura evidenciaram que o melhor modelo é o superestimado. Em função de atrasos na época da amostragem, não se obteve o momento ideal para realização das leituras. As plantas encontravam-se no estágio de emissão da sétima folha e, portanto, uma folha após a época na qual foi gerado o modelo na LINHA DE ESTUDO III (sexta folha). O estágio avançado desta lavoura refletiu em acúmulo de biomassa acima dos valores ocorridos na EEA/UFRGS para a cultivar FUNDACEP 51, que alcançou o máximo de 1268 kg ha⁻¹ (Tabela 5), enquanto que na lavoura chegou a 2588 kg ha⁻¹ (Tabela 6). Desta forma, na plotagem dos valores de biomassa relativa da lavoura

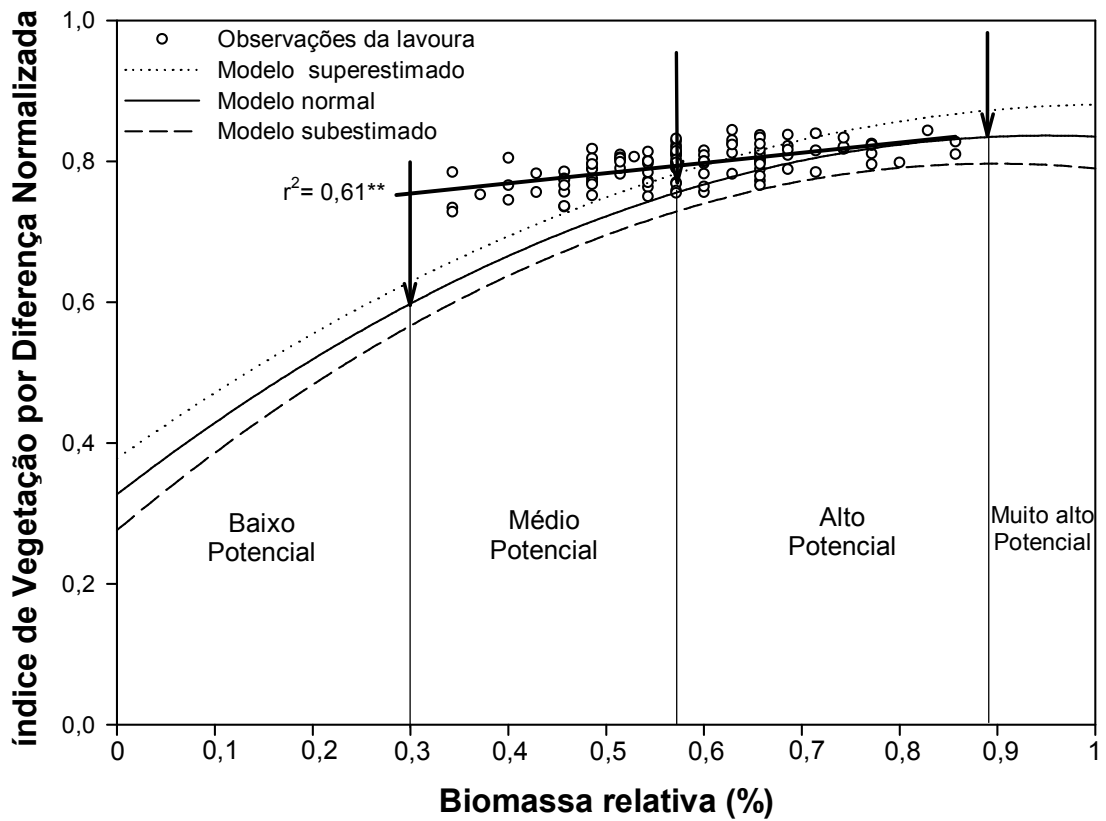
sobre as curvas do modelo de potencial produtivo, a relação aponta para um maior ajuste, destes dados ao modelo superestimado (Figura 25).

A ocorrência de eventuais atrasos na aplicação de N em lavouras, em relação ao período ideal, é fator comum no RS. A causa mais freqüente é a ocorrência de precipitação pluvial, neste momento. Raun *et al.* (2001) também estudaram estas situações, porém utilizaram método diferente. Estes quantificaram a soma térmica no período, entre duas leituras do sensor GreenSeeker, como forma de corrigir as medições de NDVI em diferentes estádios de desenvolvimento das plantas.

Desta forma, cabe avaliar se o método adotado neste trabalho pode expressar o potencial produtivo nas condições que se diferem das ideais. Para tanto, as observações foram submetidas a metodologia tradicional de análise geoestatística, descrita por Camargo *et al.* (2004).

O primeiro passo foi a análise exploratória dos dados, com a exclusão dos eventuais valores atípicos (“outliers”) que poderiam alterar o sentido predominante da variabilidade espacial. Os valores válidos para o NDVI, biomassa, rendimento de grãos e diferença relativa, bem como os valores atípicos descartados, constam no Apêndice 14.

O segundo passo foi submeter os valores válidos ao processo de análise estrutural (Camargo *et al.*, 2004). Neste trabalho, utilizou-se o procedimento isotrópico para análise semivariográfica, não sendo determinado efeito anisotrópico relevante. No modelo isotrópico considera-se que a dependência espacial entre as variáveis regionalizadas é a mesma em todas as direções (Camargo *et al.*, 2004). No Apêndice 15, encontram-se os semivariogramas teóricos das variáveis com a descrição dos parâmetros dos modelos.



¹ As setas indicam os potenciais produtivos na qual as observações da lavoura se enquadram.

² As observações da lavoura estão expressas em biomassa relativa (máximo = 2775 kg ha⁻¹).

FIGURA 25. Ajuste dos valores de biomassa de trigo amostrados na área da lavoura (Victor Graeff, RS, 2006) sobre o modelo de determinação do potencial produtivo de trigo e cevada sob resíduo de soja (EEA/UFRGS, RS, 2006).

Os modelos de semivariogramas ajustados foram exponencial para o NDVI e a diferença relativa e esférico para a biomassa e o rendimento de grãos (Tabela 7 e Apêndice 15). De acordo com Vicente (2004), o procedimento de ajuste não é um método direto e automático, mas sim interativo, pois nesse processo o intérpretador faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode-se ou não redefinir o modelo, até que seja considerado satisfatório.

A qualidade de ajuste do modelo teórico escolhido pode ser estabelecida por meio da soma do quadrado dos resíduos. O modelo utilizado foi aquele que apresentou o menor valor desta variável. Porém, para comparação da qualidade entre as variáveis, foi utilizado outro critério, o coeficiente de determinação (R^2) de ajuste do semivariograma teórico sobre o experimental. De forma geral, este foi satisfatório para todas as variáveis, ocorrendo valores de R^2 entre 0,71 e 0,92 (Tabela 7).

A análise de cada elemento dos semivariogramas fornece o comportamento da variabilidade espacial de cada variável. Este deve ser analisado sob três critérios:

O primeiro refere-se ao alcance da dependência espacial entre as amostras. Quanto maior o alcance, maior a distância na qual as amostras são dependentes entre si (Camargo *et al.*, 2004). Entre as quatro variáveis analisadas, a biomassa apresentou o maior alcance (120 m) e o rendimento de grãos o menor (34 m) (Tabela 7). Os valores de alcance encontrados nesta lavoura podem ser considerados baixos, porém resultados de outros trabalhos são diversos, pressupondo que as especificidades das características topográficas e ambientais, agem de maneira diferente entre locais, além das propriedades intrínsecas da variável analisada (Machado, 2002). Por exemplo, para o

rendimento de grãos, Jorgensen & Jorgensen (2007) encontraram alcance de 147 m em trigo, diferente do encontrado neste trabalho. Em soja, Basso *et al.* (2001) encontraram alcance de 150 m para o rendimento de grãos, enquanto que Millani *et al.* (2006) obtiveram alcance de 56 m para esta mesma variável.

O segundo critério refere-se a força da dependência espacial entre as amostras até o alcance atingido. Cambardella *et al.* (1994) propuseram um índice para avaliar esta força. De acordo com este índice, o NDVI e o rendimento de grãos apresentaram forte dependência espacial entre as amostras, já a biomassa e a diferença relativa apresentaram dependência moderada (Tabela 7).

O terceiro critério refere-se a ocorrência do efeito pepita. Este demonstra o quanto a amostra não recebe influência espacial. Neste caso, a amostra recebe a influência de outros fatores (escala da amostragem, erros de amostragem ou de análises laboratoriais) (Camargo *et al.*, 2004). Os maiores valores de efeito pepita ocorreram para a biomassa e a diferença relativa e os menores para o NDVI e o rendimento de grãos (Tabela 7). Desta forma, o espaçamento do grid de amostragem adotado (20 x 20 m) para coleta de plantas poderá vir a ser reduzido em estudos futuros, com o objetivo de elevar a acurácia dos resultados.

Desta forma, com base nos três critérios descritos espera-se que o NDVI, a biomassa e a diferença relativa apresentem zonas bem definidas com grande amplitude de extensão ao longo da área, ao contrário do rendimento de grãos, que sugere que ocorram zonas menores e segmentas.

O terceiro passo do procedimento geoestatístico refere-se a interpolação estatística e a respectiva construção dos mapas temáticos de isolinhas (Camargo *et al.*, 2004) utilizados.

TABELA 7. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas das variáveis Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), biomassa relativa, rendimento de grãos relativo e diferença relativa, determinadas na área da lavoura. Victor Graeff, RS, 2006.

Modelo	$(R^2)^1$	Alcance ²	IDE ³	Efeito pepita ⁴	Patamar
		A_0	$C_0/(C+C_0)$	C_0	$C+C_0$
		--- m ---	----- % -----	----- (unidade) ² -----	
----- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada -----					
Exponencial	0,86	73	14	0,000098	0,000713
----- Biomassa relativa -----					
Esférico	0,92	120	50	0,00729	0,01468
----- Rendimento relativo de grãos -----					
Esférico	0,73	34	0,15	0,000020	0,01294
----- Diferença relativa entre biomassa e rendimento de grãos -----					
Exponencial	0,71	83	50	0,01539	0,03088

¹ Quanto mais próximo da unidade estiver o valor de R^2 maior o número de pontos do semivariograma experimental que encontra-se na curva do modelo teórico.

² Quanto maior o alcance, maior a distância na qual as amostras são dependentes entre si.

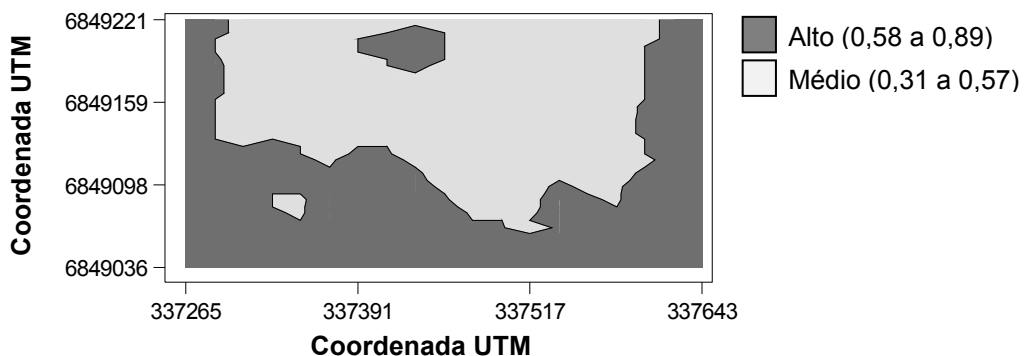
³ Força da dependência espacial entre as amostras até o alcance atingido, conforme proposto por Cambardella *et al.* (1994): $\leq 25\%$ - forte dependência espacial, entre 25 e 75% - moderada dependência espacial, $\geq 75\%$ - fraca dependência espacial.

⁴ Quanto mais próximo o Efeito Pepita estiver ao Patamar, maior a probabilidade de ocorrer o Efeito Pepita Puro, demonstrando que as amostras não recebem influência espacial.

A interpolação faz-se por meio de métodos específicos, existindo diversos interpoladores. Neste trabalho, foi utilizada a krigagem ordinária pontual (Vicente, 2004) e após a geração dos mapas, foi utilizado o coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados (validação cruzada) (Vicente, 2004), para avaliação da qualidade dos procedimentos estatísticos. No Apêndice 16, constam os coeficientes da correlação entre os valores reais e estimados pelo procedimento estatístico utilizado. De forma geral, a correlação entre os valores observados e estimados foi média (entre 0,29 e 0,45). Este valor era esperado, por ser pequeno o número de amostras considerado nos semivariogramas e baixa a variabilidade dos valores na lavoura. Porém, os valores mantiveram-se similares entre si, mostrando que os procedimentos utilizados foram eficientes, dada as características das amostras.

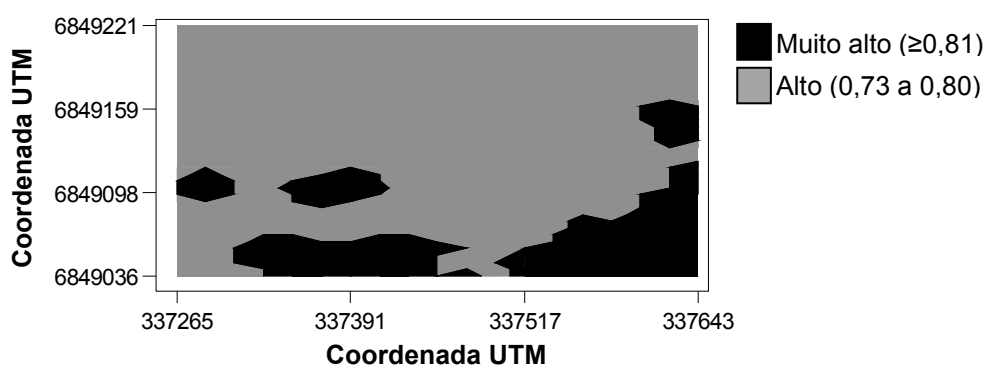
A construção dos mapas deve ser delimitada por classes a fim de gerar as zonas de manejo e estas, já foram delimitadas na Tabela 6. Desta forma, confirmam-se na Figura 26.1 as classes “médio” e “alto” potencial produtivo para a biomassa. Também é confirmado o modelo superestimado como o melhor representante da variabilidade espacial das classes “médio” e “alto” potencial pelo NDVI (Figura 26.2.3). Ao contrário dos modelos normal (Figura 26.2.1) e subestimado (Figura 26.2.2), que não foram eficientes em representar as classes de potencial produtivo ou sua distribuição ao longo da área. Também Mullen *et al.* (2003) com o sensor GreenSeeker, estudaram situação similar, em três épocas de aplicação de N (sendo a primeira a recomendada), e verificaram que na segunda época, o NDVI atingiu seu valor máximo e, na terceira (mais tardia), foi mínimo, em função da exposição da superfície de fundo devido a senescência das folhas.

26.1 Biomassa acumulada na parte aérea

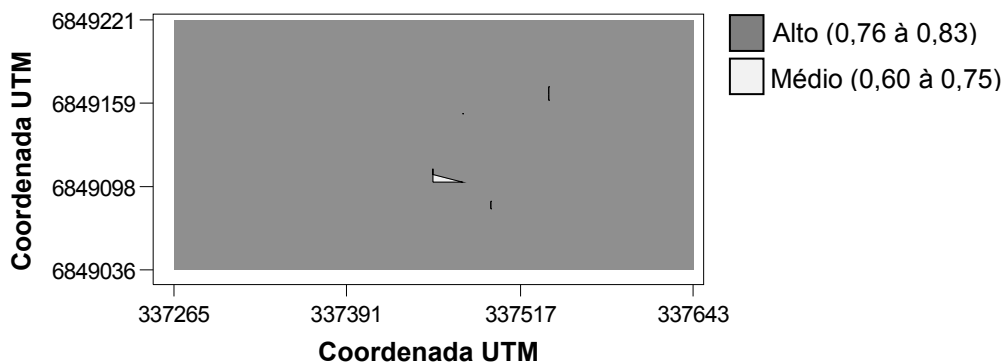


26.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

26.2.1. Modelo subestimado



26.2.2. Modelo normal



26.2.3. Modelo superestimado

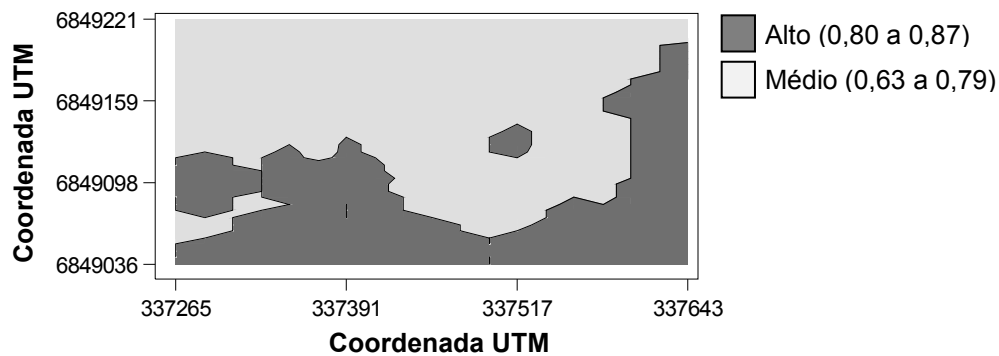


FIGURA 26. Mapas de isolinhas, obtidos por meio do método de krigagem ordinária da biomassa acumulada na parte aérea e do potencial produtivo baseado no NDVI, classificado conforme três modelos.

O rendimento de grãos, classificado segundo as classes de potencial produtivo (Figura 27.1.1), confirmou as classes “médio” e “alto” (Tabela 6) como as de maior frequência na área. Porém, a sua distribuição ao longo da área confirmou o pré-determinado pela análise variográfica, altamente segmentada com zonas de menor amplitude.

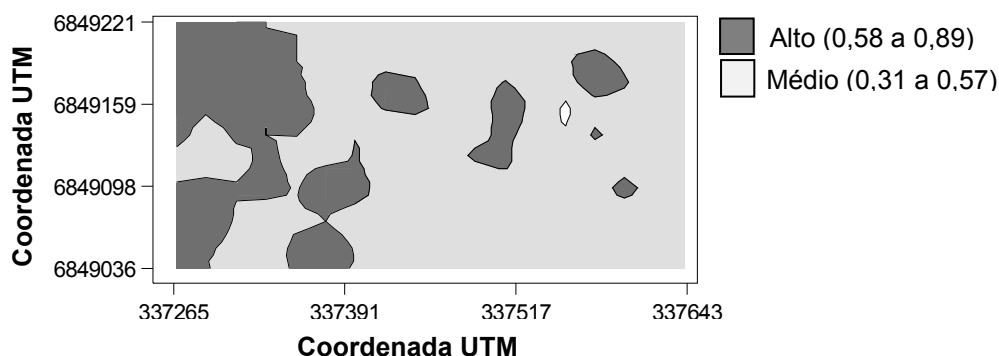
Desta forma, adotou-se um segundo método de classificação dos valores. A partir dos valores mínimo e máximo de rendimento relativo (0,26 e 0,79) (Apêndice 14) foram definidas duas novas classes, gerando-se um novo mapa (Figura 27.1.2). Metodologia semelhante foi adotada por Millani *et al.* (2006), na geração de zonas de manejos em mapas de produtividade de soja. Os autores utilizaram o coeficiente de variação para estimar classes em torno da média. Por este segundo método, ficou confirmado que a classificação do rendimento de grãos pelas classes de potencial produtivo não foi eficiente em expressar a melhor distribuição da variabilidade espacial do rendimento de grãos.

Já as classes de diferença relativa foram determinadas pela diferença entre a biomassa e o rendimento de grãos, conforme já mencionado anteriormente. Na Figura 27.2, observa-se que a variabilidade espacial destas classes foi bem definida ao longo da área estudada.

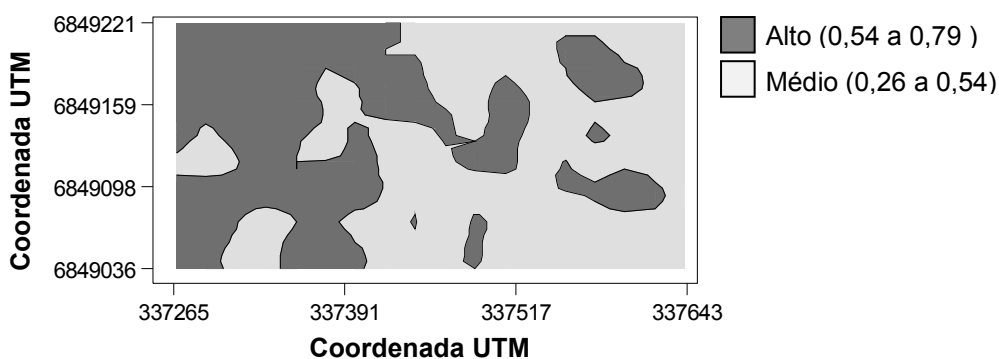
Os mapas gerados serviram de base para a real validação do modelo desenvolvido, por meio da análise da correspondência (sobreposição) entre estes mapas. Os mapas das variáveis: biomassa, rendimento de grãos e diferença relativa, respectivamente Figuras 26.1, 27.1.2 e 27.2, foram sobrepostos ao mapa do modelo superestimado (Figura 26.2.3), obtendo-se os mapas de correspondência na Figura 28 que são expressos em termos percentuais de área sobreposta e não-sobreposta.

27.1. Rendimento relativo de grãos:

27.1.1 Classificado a partir das classes de potencial produtivo (Tabela 6)



27.1.2 Classificado a partir da média e valores extremos das observações (Apêndice 14)



27.2 Diferença relativa entre as classes determinadas pelas Figuras 26.1 e 27.1.2

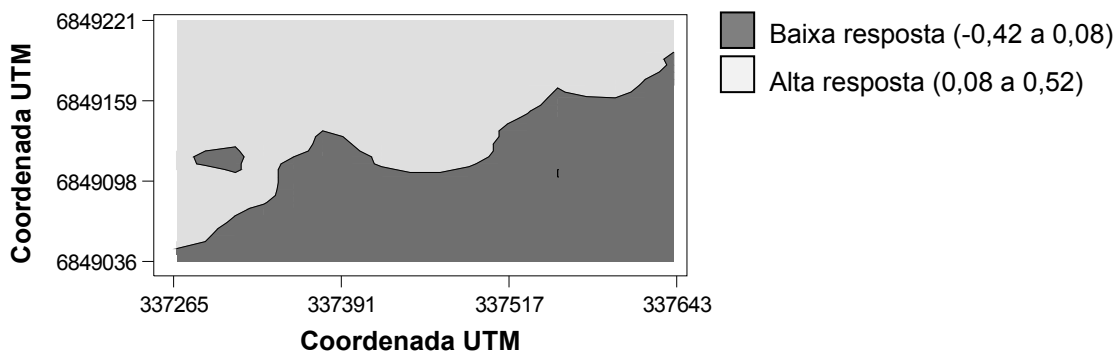
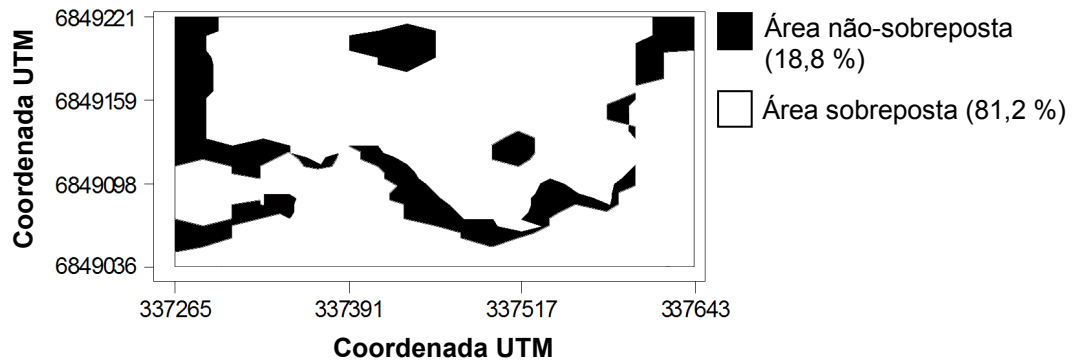
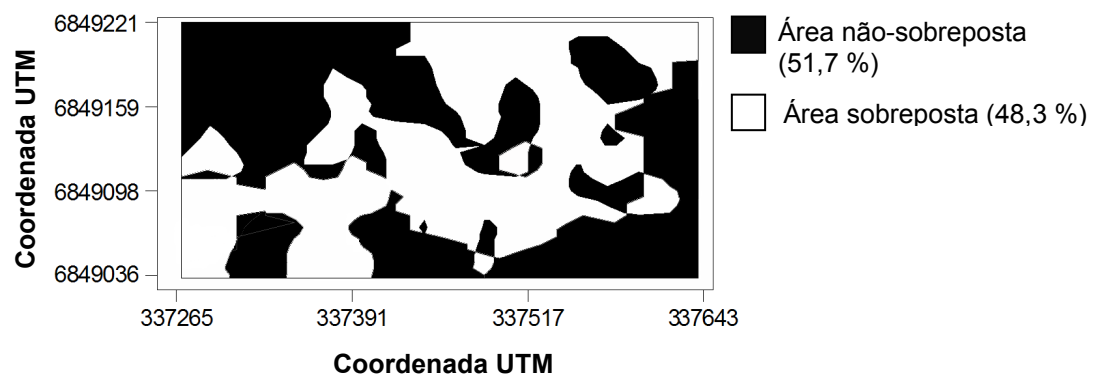


FIGURA 27. Mapas de isolinhas obtidos por meio do método de krigagem ordinária pontual, do rendimento de grãos (segundo dois critérios de classificação dos valores) e da diferença relativa entre a biomassa relativa e o rendimento relativo de grãos.

28.1. Modelo superestimado (Figura 26.2.3) x biomassa (Figura 26.1)



28.2. Modelo superestimado (Figura 26.2.3) x rendimento de grãos (Figura 27.1.2)



28.3. Modelo superestimado (Figura 26.2.3) x diferença relativa (Figura 27.2)

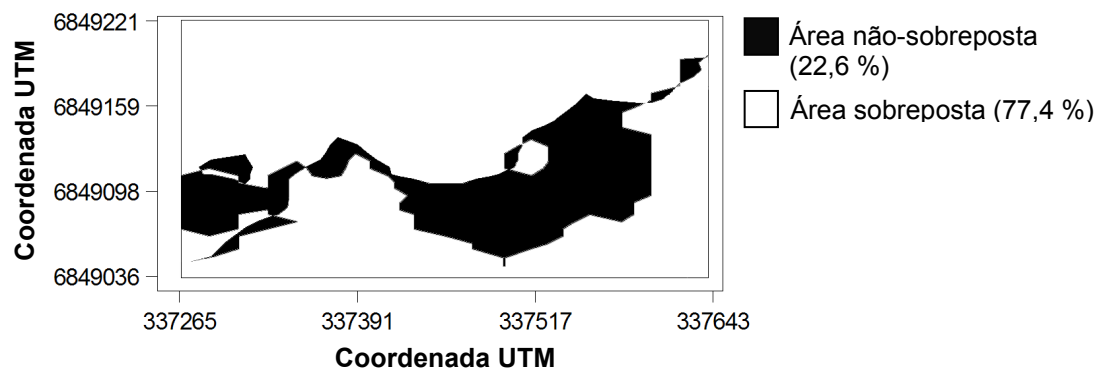


FIGURA 28. Mapas e percentual de sobreposição entre os mapas de isolinhas do potencial produtivo superestimado com a biomassa acumulada na parte aérea relativa, rendimento relativo de grãos e diferença relativa entre a biomassa relativa e o rendimento relativo de grãos.

O mapa de potencial produtivo gerado pelo NDVI, a partir do modelo superestimado, mostrou uma alta (81,2 %), média (48,3 %) e alta (77,4 %) sobreposição com os mapas de biomassa (Figura 28.1), rendimento de grãos (Figura 28.2) e resposta (Figura 28.3), respectivamente. A alta concordância entre os mapas de NDVI com biomassa era esperada. Moges *et al.* (2004), utilizando o sensor GreenSeeker em trigo, definiram que é íntima a associação entre estas variáveis, independente dos fatores de variabilidade temporal. Araújo *et al.* (2005), trabalhando com videografia aérea também em trigo, evidenciaram elevada correlação entre o NDVI com o IAF da cultura, por ocasião do pré-florescimento da cultura.

A baixa concordância do NDVI com o rendimento de grãos já era esperada. Casa & Castrignanó (2007) verificaram que a variabilidade temporal nesta variável é mais forte que a espacial, de maneira que, a simples relação entre o NDVI e o rendimento de grãos é instável ao longo dos anos. Porém, Raun *et al.* (2002) determinaram que, mesmo sendo baixa a associação entre estes mapas, as doses aplicadas a taxas variáveis apresentaram a melhor relação custo x benefício do que as doses aplicadas em taxa uniforme.

A alta sobreposição do modelo baseado no NDVI, com a diferença relativa, seguiu o estabelecido anteriormente. De forma geral, houve a concordância da classe de “alto” potencial produtivo (Figura 26.2.3) com a classe “baixa resposta” (Figura 27.3) assim como, da classe de “médio” potencial produtivo com a “alta resposta”. Provavelmente, as doses aplicadas pelo produtor foram elevadas, o que permitiu definir este resultado. Raun *et al.* (2002) estabeleceram que o ganho, com o aumento da eficiência de uso do nitrogênio, é a maior vantagem econômica do sensor. O aumento desta foi calculado em torno de 15%.

A concordância do modelo com a resposta é a base para a continuidade dos estudos futuros na quantificação das doses de N. Bredemeier (1999) e Polleto (2004), já avaliaram para as condições do RS os princípios que regem as diferentes respostas do N, para diferentes condições nutricionais em trigo e cevada. Cabe adaptar estas informações às classes de potencial produtivo determinadas por este modelo e confirmar a campo se as respostas verificadas são devidas prioritariamente pela flutuação espacial do N.

5. CONCLUSÕES

O uso das classes pelo NDVI foi a principal inovação na formulação do modelo proposto para estimativa das classes de potencial produtivo em cereais de inverno na emissão da sexta folha. Ele mostra-se vantajoso, pois é uma metodologia que estabelece de maneira rápida e expedita, a partir de uma única leitura com o sensor, zonas para o manejo do N.

Outra inovação do modelo é dada pelo isolamento dos efeitos das espécies de trigo e cevada e das cultivares dentro destas, permitindo o uso do sensor ao longo dos anos sem correções. Entre os valores extremos de certa classe de potencial produtivo, diferenças entre cultivares ocorrem, porém, em uma classe superior, estas diferenças são sobrepostas pelo aumento do potencial produtivo.

A validação do modelo de potencial produtivo na lavoura foi suficiente para confirmar que as classes, expressas pelo NDVI, são indicadoras de variabilidade espacial da biomassa, por ocasião da emissão da sexta folha.

O modelo permitiu que a avaliação poderá ser realizada em épocas posteriores ao momento ideal. O modelo superestimado foi eficiente em detectar variabilidade espacial na lavoura. Nos momentos anteriores, mais estudos são necessários, pois é maior a o efeito da superfície de fundo.

O uso do modelo para determinação do potencial produtivo, na análise da variabilidade espacial da área da lavoura, como indicador direto do rendimento de grãos não indicou ser viável. Porém, foi viável para estimativa do potencial produtivo das plantas na emissão da sexta folha, indicando, portanto, a variabilidade de um dos principais componentes do rendimento. Este resultado rege os trabalhos futuros, partindo do princípio de que, o NDVI é associado à resposta da planta num estágio anterior à definição dos outros componentes de rendimento.

O modelo para correção dos elementos da superfície de fundo e meteorológicos foi eficiente em melhorar as leituras de NDVI do dossel, pois sendo retirada a influência destes elementos, este NDVI foi amplificado, acentuando sua relação com a condição nitrogenada das plantas.

O modelo para correção é viável nas condições de brusca modificação dos elementos de interferência do NDVI. Porém, sua validação deu-se em situação experimental, de forma que, seria recomendada a confirmação em lavouras, da sua real eficiência ao longo dos anos.

A diferença de NDVI entre tipos de resíduo e solo exposto, variando de acordo com a umidade do solo, são resultados que poderão futuramente auxiliar em trabalhos de sensoriamento remoto, servindo como referência para tecnologias que partam do mesmo princípio que o sensor GreenSeeker.

A continuidade do aperfeiçoamento do modelo passa pela verificação do tipo de resposta ao N, para cada classe de potencial produtivo, a fim de poder ajustar doses relativas de N. Porém, as doses só serão ajustadas precisamente em termos absolutos, quando forem estabelecidas, nas regiões produtoras, o tipo de resposta das plantas ao nitrogênio que cada cultivar desenvolvida apresenta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRITEMPO. **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agroclima/pesquisaWeb?uf=RS/>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

APARICIO, N. et al. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. **Crop Science**, Madison, v.42, p.1547–1555, 2002.

ARAÚJO, J.C.; VETTORAZZI, C.A.; MOLIN, J.P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea multiespectral. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.27, n.3, p.437-447, 2005.

BASSO, B. et al. Spatial validation of crop models for precision agriculture. **Agricultural Systems**, Barking, v.68, p.97-112, 2001.

BAYER, C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.101-109, 2000.

BELLAIRS, M. et al. Plant and soil influences on estimating biomass of wheat in plant breeding plots using field spectral radiometers. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.47, n.7, p.1017-1034, 1996.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2003. 77p

BERGAMASCHI, H. **Dados meteorológicos da Estação Experimental Agrônômica da UFRGS**. Porto Alegre: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Planilha eletrônica.

BOOCHS, F. et al. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.11, n.10, p.1741–1753, 1990.

BRAGA, H.J. **Previsão Agrícola: uma nova abordagem – uso de scanner aerotransportável e redes neurais**. Florianópolis : UFSC, 1995. 197f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Estádios fenológicos do trigo para adubação em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.2, v.25, p.317-323, 2001.

CAMARGO et al. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S. et al. (Eds.) **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2004. p.79-122.

CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p. 1501-1511, 1994.

CAIERÃO, E. Resultados agronômicos e qualitativos da nova cultivar de cevada MN 743. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.6, p.1441-1443, 2005.

CASA, R.; CASTRIGNANO, A. Analysis of spatial relationships between soil and crop variables in a durum wheat field using a multivariate geostatistical approach. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

CARTER, G.A.; KNAPPA, A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany**, West Oregon, n.4, v.88, p.677-684, 2001.

CECCATO, P. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.77, p.22-33, 2001.

COMISSÃO. **Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2004. 400p.

DALMOLIN, R.S.D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.2, p.481-489, 2005.

DAUGHTRY, C.S.T. et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.74, p.229-239, 2000.

DAUGHTRY, C.S.T. et al. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.90, p.126-134, 2004.

DE BOER, J.L. **The management time economics of on-the-go sensing for nitrogen application**. Disponível em: <<http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/Frames>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

EHLERT, D.; SCHMERLER, J.; VOELKER, U. Variable rate nitrogen fertilisation of winter wheat based on a crop density sensor. **Precision Agriculture**, New York, v.5, p.263–273, 2004.

EMBRAPA TRIGO. **Informações técnicas para safra 2007 – Trigo e Triticale**. Passo Fundo, 2005. 102 p.

EMBRAPA TRIGO. **Indicações técnicas para a produção de cevada cervejeira nas Safras 2005 e 2006**. Passo Fundo, 2007. 114 p.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento Remoto de três parâmetros agronômicos de trigo e feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.10, p.1615-1624, 1991.

EVANS, L.T.; FISCHER, R. A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. **Crop Science**, Madison, v.39, p.1544–1551, 1999.

FIGUEIREDO D. **Conceitos de sensoriamento remoto**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/download>>. Acesso em: 15 de jan. 2008.

FLOWERS, M.R. et al. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decisions in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p.167–176, 2003.

FUNDACEP. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.fundacep.com.br>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

GATES, D.M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, v.4, p.11–20, 1965.

GAO, X. et al. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.74, p.609-620, 2000.

GITELSON, A.A.; MERZLYAK, M.N.; LICHTENTHALER, H.K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, Löbdergraben, v.148, p.501–508, 1996.

GIRMA, K. et al. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.29, p.873–897, 2006.

HORLER, D.N.H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.4, n.2, p.273–288, 1983.

HUETE, A.R. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.17, p.37-53, 1985.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; MAYFIELD, T. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. **Sensor Review**, Bingley, v.25, n.3, p. 209-214, 2005.

JACKSON, R.D. et al. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. **Applied Optics**, Washington, v.18, n.22, p.3730-3731, 1979.

JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER, P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. **Remote Sensing of the Environment**, New York, v.15, p.187-208, 1983.

JACKSON, R.D; PINTER JUNIOR, P.J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of the Environment**, New York, v.20, n.1, p.43-56, 1986.

JACQUEMOUD, S.; USTIN, S.L. Leaf Optical Properties: A State Of The Art. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PHYSICAL MEASUREMENTS & SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 8., 2001, Aussois. **Résumés...** Toulouse: CNES, 2001. Disponível em: <<http://www.cstars.ucdavis.edu/papers/>> Acesso em: 20 fev. 2008.

JAYNES, D.B. et al. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.30, p.1305-1314, 2001.

JIANG, Z. et al. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.101, p.366-378, 2006.

JORGENSEN, J.R.; JORGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. **Precision Agriculture**, New York, v.8, p.63-73, 2007.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1979. 272p.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.1, p.155-159, 1970.

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p. Cap. 4: Características espectrais da vegetação; cap. 7: Índices de vegetação.

MACHADO, S. Spatial and temporal variability of sorghum grain yield: influence of soil, water, pests, and diseases relationships. **Precision Agriculture**, New York, v.3, p.389-406, 2002.

MENESES, P.R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. (Eds.) **Sensoriamento Remoto**: reflectância de alvos espectrais. Brasília: EMBRAPA Cerrados, 2001. p.15-40.

MILANI, L. et al. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.4, p.591-598, 2006.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17, n.2, p.97-107, 1997.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão**: O gerenciamento da variabilidade. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83p. Cap: 5 Tratamentos localizados.

MOGES, S.M. et al. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, n.8, p.1431–1441, 2004.

MOREIRA, M.A. et al. Variação espectral e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa em ensaio com genótipos de trigo. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.3, p.331-338, 2005.

MUNDSTOCK, C.M. **Planejamento e manejo integrado da lavoura de trigo**. Porto Alegre: Evangraf, 1999. 228p. Cap: 19 Manejo do nitrogênio em cobertura.

MULLEN, R. W. et al. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v.95, p.347–351, 2003.

NAGLER, P. L; DAUGHTRY, C.S.T.; GOWARD, S.N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.71, p.207-215, 2000.

NETCH INDUSTRIES. **Green seeker Manuals Downloads**. Disponível em: <<http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

OLIVEIRA, M.L. et al. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura da vegetal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.535-539, 2005.

OR SEMENTES. **Cultivares**. Disponível em: <<http://www.orsementes.com.br/prod.htm>> Acesso em: 15 jan. 2008.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends In Plants Science**, London, v.3, n.4, p.151-156, 1998.

PHILLIPS, S.B. et al. Estimating winter wheat tiller density using spectral reflectance sensors for early-spring, variable-rate nitrogen applications. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, p.591-600, 2004.

PIRES, J.L.F. et al. **Discutindo agricultura de precisão** – Aspectos gerais. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2008.

POLETTO, N. **Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. (Eds.) **Sensoriamento Remoto** – reflectância de alvos espectrais. Brasília: EMBRAPA Cerrados, 2001. p.157-199.

PRICE, J.C.; BAUSCH, W.C. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.52, p.55-65, 1995.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, n.3, p.357–363, 1999.

RAUN, W.R. et al. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.131-138, 2001.

RAUN, W.R. et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, p.815-820, 2002.

RAUN, W.R. et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.36, p.2759-2781, 2005.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. v.1, p.309-317.

SEMBIRING, H. et al. Effect growth stage and variety on spectral radiance in winter wheat. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.23, p.141–149, 2000.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PENUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, Madison, v.40, p.723-731, 2000.

SILVA, DA J.T.M.; ALEXANDRE, C. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics, **Precision Agriculture**, New York, v.6, p.453-466, 2005.

SLATON, M.R.; HUNT JR, E.R.; SMITH W.K.. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, West Oregon, v.88, p.278-284, 2001.

SOUZA, E.G. et al. Influência da direção de semeadura do milho nas variáveis reflectância e Índice de Vegetação Verde Normalizado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.1, p.79-84, 2004.

STAFFORD, J. V. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.76, p.267-275, 2000.

STONE, M.L. et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.39, n.5, p.1623-1631, 1996.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS : UFRGS, 2002. 107p.

SULLIVAN, D.G. et al. Evaluation of multispectral data for rapid assessment of wheat straw residue cover. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.68, p.2007-2013, 2004.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1985. 176p.

THORNE, G.N.; WOOD, D.W. Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. *Annals of Botany*, London, v.59, p.413-426, 1987.

VICENTE, J. **Estudo comparativo de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão**. Presidente Prudente – SP : Unesp, 2004. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

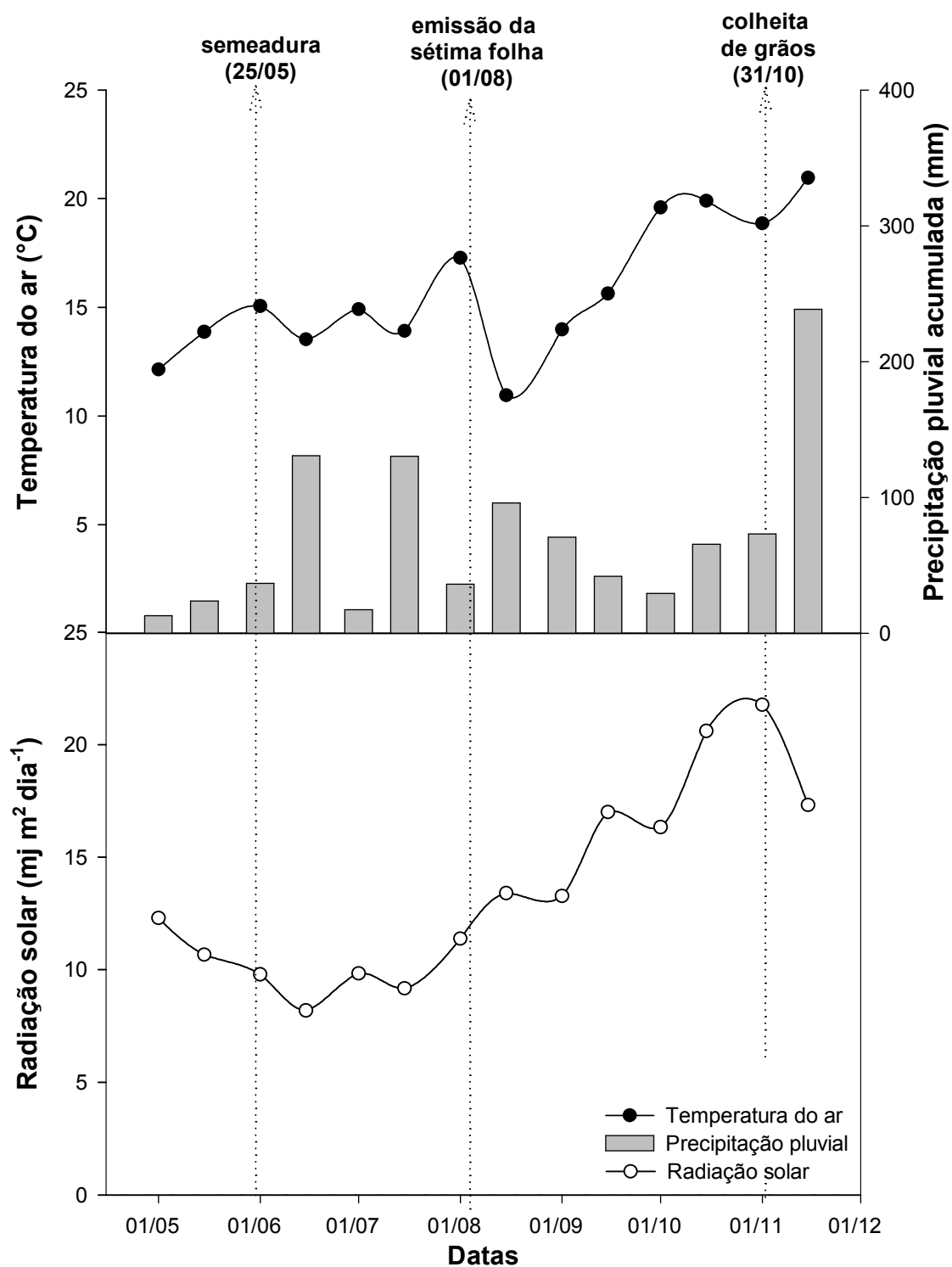
WAMSER, A.F. **Estádios críticos para suplementação nitrogenada em cevada**. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

WOBETO, C. **Padrão de afilhamento, sobrevivência de afilhos e suas relações com o rendimento de grãos em trigo**. 1994. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

WONG, M.T.F.; ASSENG, S. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of upscaling a crop model. *Plant and Soil*, New York, v.283, p.203-215, 2006.

YODER, B.J.; CROSBY, R.E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-9,500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.53, p.199-211, 1995.

7. APÊNDICES

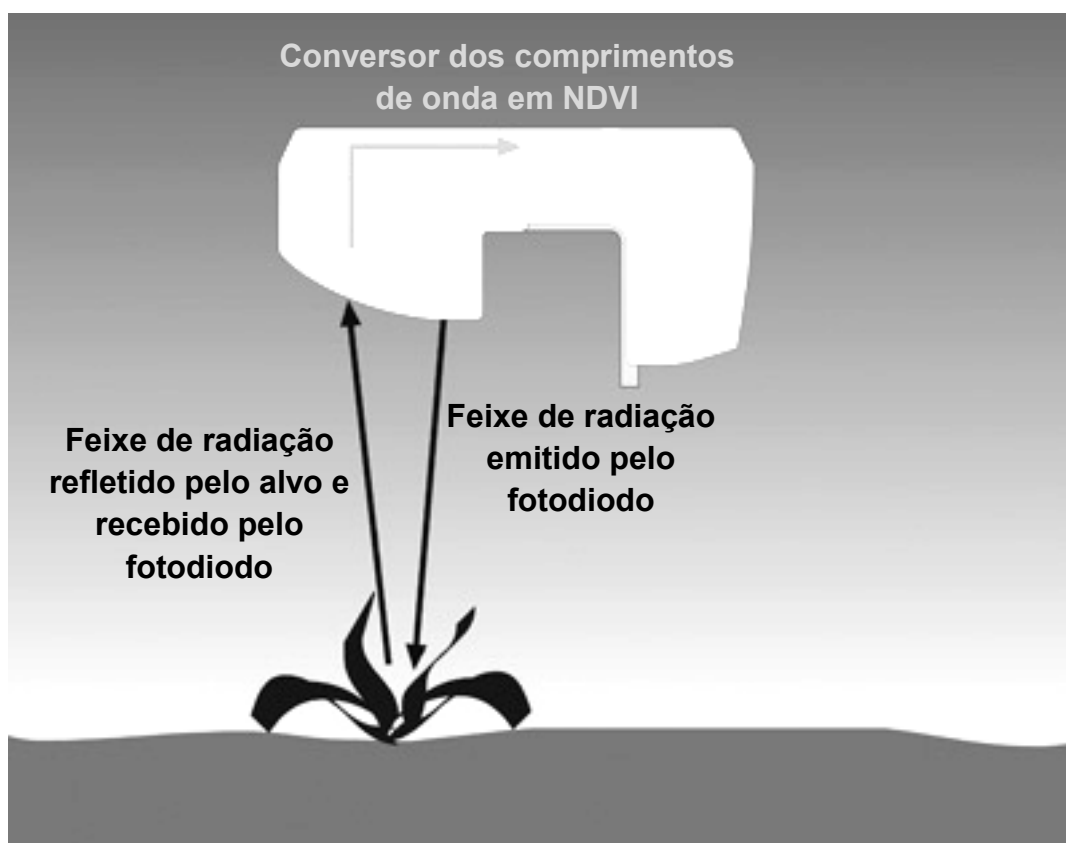


APÊNDICE 1. Temperatura média do ar, precipitação pluvial acumulada em 15 dias e radiação solar global em 15 dias, no período entre a sementeira e a colheita de grãos. Passo Fundo, RS, 2006.

Sensor GreenSeeker e principais componentes



Sistema de obtenção das leituras de NDVI pelo fotodiodo do sensor



APÊNDICE 2. Desenho diagramático do sensor GreenSeeker, com principais componentes e forma de obtenção dos dados. (Adaptado de NTech industries, 2008).

APÊNDICE 3. Média do rendimento de grãos (kg ha^{-1}), avaliado na LINHA DE ESTUDO II, em áreas sob resíduos de milho e soja, com e sem exposição do solo, nas cultivares de trigo (ÔNIX) e cevada (MN 743). EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

Ano	Tipo de resíduo	Espécie	Exposição do solo	Rendimento de grãos
2006	Milho	Cevada	Sem	3505
2006	Milho	Cevada	Com	3646
2006	Milho	Trigo	Sem	3694
2006	Milho	Trigo	Com	3648
2006	Soja	Cevada	Sem	3434
2006	Soja	Cevada	Com	3842
2006	Soja	Trigo	Sem	4101
2006	Soja	Trigo	Com	3523
2007	Milho	Cevada	Sem	2017
2007	Milho	Cevada	Com	2103
2007	Milho	Trigo	Sem	1720
2007	Milho	Trigo	Com	1670
2007	Soja	Cevada	Sem	2186
2007	Soja	Cevada	Com	2477
2007	Soja	Trigo	Sem	2007
2007	Soja	Trigo	Com	2281

APÊNDICE 4. Média do número de colmos ($n^{\circ} m^{-2}$), avaliado LINHA DE ESTUDO III, com três densidades de plantas e cinco doses de N na semeadura, em trigo (cultivares ÔNIX, FUNDACEP e SAFIRA) e cevada (cultivares MN 743 e BRS 195). EEA/UFRGS, RS, 2006.

Densidade ¹ plantas m ⁻²	Doses de N kg ha ⁻¹	Cultivares				
		BRS 195	MN 698	ONIX	SAFIRA	FUND. 51
----- Resíduo de milho -----						
1	0	503	243	282	648	571
1	20	771	470	540	591	648
1	40	615	567	507	648	853
1	60	717	473	678	566	714
1	80	908	727	666	664	958
2	0	520	621	258	386	748
2	20	1023	662	543	752	745
2	40	917	722	796	933	1036
2	60	1360	1037	800	885	1016
2	80	1102	776	799	840	1252
3	0	533	335	507	638	613
3	20	898	659	528	906	843
3	40	1246	814	830	944	1172
3	60	1108	962	939	1100	1535
3	80	1412	964	1160	1513	1323
----- Resíduo de soja -----						
1	0	455	392	414	474	375
1	20	667	503	365	624	676
1	40	789	629	483	713	833
1	60	780	1078	658	798	763
1	80	835	599	606	702	837
2	0	495	492	340	521	627
2	20	1067	713	652	847	811
2	40	946	816	678	1089	984
2	60	1200	1056	630	898	1174
2	80	1219	891	967	1051	1075
3	0	594	444	551	666	635
3	20	917	506	636	647	958
3	40	1203	685	715	1175	1063
3	60	1172	774	591	1538	1359
3	80	1101	1002	850	1167	1367

APÊNDICE 5. Média da concentração de N da parte aérea (%), avaliado LINHA DE ESTUDO III, com três densidades de plantas e cinco doses de N na semeadura, em trigo (cultivares ÔNIX, FUNDACEP e SAFIRA) e cevada (cultivares MN 743 e BRS 195). EEA/UFRGS, RS, 2006.

Densidade plantas m ⁻²	Doses de N kg ha ⁻¹	Cultivares				
		BRS 195	MN 698	ONIX	SAFIRA	FUND. 51
----- Resíduo de milho -----						
1	0	4,0	4,1	4,5	4,8	4,0
1	20	4,0	4,5	3,8	4,4	4,2
1	40	4,9	5,0	4,4	4,8	3,6
1	60	5,1	4,7	4,8	3,6	4,7
1	80	5,6	5,1	4,2	5,7	3,4
2	0	3,8	3,7	4,4	3,7	3,2
2	20	4,0	3,2	3,0	3,9	3,0
2	40	4,6	3,8	4,1	3,3	4,4
2	60	4,7	4,3	4,0	3,6	3,7
2	80	3,9	4,9	4,1	3,9	3,2
3	0	4,2	3,0	3,2	4,4	2,8
3	20	3,8	3,6	3,2	4,5	2,8
3	40	4,6	3,6	3,1	4,9	3,1
3	60	4,3	3,8	4,0	4,4	3,9
3	80	5,0	4,3	4,1	4,7	3,3
----- Resíduo de soja -----						
1	0	4,0	3,7	4,0	3,9	4,2
1	20	4,5	3,7	4,1	4,6	4,3
1	40	4,3	4,0	4,7	4,8	3,6
1	60	4,2	4,0	3,9	5,0	4,1
1	80	4,2	4,0	5,0	5,1	4,5
2	0	3,5	2,2	3,7	3,1	3,2
2	20	3,2	3,0	3,8	3,5	3,3
2	40	3,6	3,7	4,2	3,7	3,6
2	60	4,1	3,8	4,3	4,1	4,0
2	80	4,2	3,9	4,6	4,8	3,7
3	0	2,7	2,5	3,3	4,0	2,8
3	20	3,4	3,6	3,6	3,4	2,7
3	40	3,2	2,6	3,8	4,1	3,3
3	60	3,5	3,2	3,4	4,4	3,2
3	80	3,6	3,3	3,3	4,2	3,3

APÊNDICE 6. Média do número de espigas ($n^{\circ} m^{-2}$), avaliado LINHA DE ESTUDO III, com três densidades de plantas e cinco doses de N na semeadura, em trigo (cultivares ÔNIX, FUNDACEP e SAFIRA) e cevada (cultivares MN 743 e BRS 195). EEA/UFRGS, RS, 2006.

Densidade plantas m^{-2}	Doses de N $kg ha^{-1}$	Cultivares				
		BRS 195	MN 698	ÔNIX	SAFIRA	FUND. 51
----- Resíduo de milho -----						
1	0	632	465	358	354	302
1	20	708	493	354	437	368
1	40	776	561	429	449	395
1	60	833	587	439	493	430
1	80	761	568	481	581	437
2	0	699	533	385	385	349
2	20	765	551	420	447	378
2	40	862	630	451	538	440
2	60	824	732	500	594	459
2	80	862	691	556	620	532
3	0	704	588	551	482	496
3	20	740	571	546	471	440
3	40	797	591	541	566	457
3	60	893	695	588	590	513
3	80	880	678	569	624	551
----- Resíduo de soja -----						
1	0	550	496	333	429	325
1	20	611	538	391	468	381
1	40	719	549	366	530	404
1	60	799	621	435	556	461
1	80	699	606	475	549	449
2	0	624	557	363	436	365
2	20	746	619	402	504	439
2	40	767	671	445	593	471
2	60	829	676	494	621	460
2	80	860	674	496	540	471
3	0	677	593	605	448	548
3	20	768	578	575	488	544
3	40	835	625	587	554	527
3	60	852	654	579	621	535
3	80	882	715	557	613	515

APÊNDICE 7. Média do peso de grãos (mg), avaliado LINHA DE ESTUDO III, com três densidades de plantas e cinco doses de N na semeadura, em trigo (cultivares ÔNIX, FUNDACEP e SAFIRA) e cevada (cultivares MN 743 e BRS 195). EEA/UFRGS, RS, 2006.

Densidade plantas m ⁻²	Doses de N kg ha ⁻¹	Cultivares				
		BRS 195	MN 698	ÔNIX	SAFIRA	FUND. 51
----- Resíduo de milho -----						
1	0	44	50	40	38	44
1	20	45	50	40	39	45
1	40	45	48	40	40	46
1	60	44	49	41	40	45
1	80	44	48	40	41	45
2	0	44	49	40	39	44
2	20	44	48	39	40	44
2	40	45	47	39	39	44
2	60	45	50	41	39	45
2	80	45	49	40	41	44
3	0	45	47	38	39	41
3	20	44	47	39	41	42
3	40	42	47	38	40	43
3	60	43	47	39	40	42
3	80	42	53	40	40	43
----- Resíduo de soja -----						
1	0	46	51	41	40	46
1	20	46	52	41	40	48
1	40	46	50	38	40	41
1	60	44	46	37	40	45
1	80	44	47	37	41	43
2	0	45	48	39	41	45
2	20	48	46	41	41	43
2	40	44	47	40	40	42
2	60	46	54	38	40	43
2	80	47	50	38	41	45
3	0	45	47	37	43	41
3	20	44	47	38	39	42
3	40	44	46	40	41	41
3	60	46	46	38	39	42
3	80	45	42	39	42	41

APÊNDICE 8. Média do número de grãos por espiga, avaliado na LINHA DE ESTUDO III, com três densidades de plantas e cinco doses de N na semeadura, em trigo (cultivares ÔNIX, FUNDACEP e SAFIRA) e cevada (cultivares MN 743 e BRS 195). EEA/UFRGS, RS, 2006.

Densidade plantas m ⁻²	Doses de N kg ha ⁻¹	Cultivares				
		BRS 195	MN 698	ÔNIX	SAFIRA	FUND. 51
----- Resíduo de milho -----						
1	0	14	17	25	25	31
1	20	13	17	29	23	24
1	40	13	18	26	24	28
1	60	14	17	27	24	28
1	80	16	18	27	22	28
2	0	13	17	25	22	25
2	20	15	17	27	22	25
2	40	14	17	26	21	24
2	60	13	12	24	22	24
2	80	14	15	24	22	21
3	0	14	16	18	19	17
3	20	15	17	20	21	22
3	40	15	17	21	20	23
3	60	14	15	22	21	21
3	80	14	13	21	23	19
----- Resíduo de soja -----						
1	0	17	15	31	25	29
1	20	18	15	29	25	24
1	40	17	14	34	24	29
1	60	17	15	33	25	24
1	80	18	15	29	26	27
2	0	18	16	27	23	22
2	20	15	15	25	23	23
2	40	17	14	26	20	23
2	60	14	12	26	21	23
2	80	15	12	27	23	21
3	0	17	15	16	19	16
3	20	16	15	17	24	18
3	40	16	13	18	21	19
3	60	16	13	20	21	18
3	80	14	13	22	20	21

APÊNDICE 9. Média do rendimento de grãos (kg ha⁻¹), avaliado na LINHA DE ESTUDO III, com três densidades de plantas e cinco doses de N na semeadura, em trigo (cultivares ÔNIX, FUNDACEP e SAFIRA) e cevada (cultivares MN 743 e BRS 195). EEA/UFRGS, RS, 2006.

Densidade plantas m ⁻²	Doses de N kg ha ⁻¹	Cultivares				
		BRS 195	MN 698	ÔNIX	SAFIRA	FUND. 51
----- Resíduo de milho -----						
1	0	3787	4029	3439	3200	4166
1	20	4268	4238	3967	3799	4002
1	40	4677	4700	4512	4406	4985
1	60	4960	4951	4715	4589	5397
1	80	5287	5013	5143	5146	5444
2	0	4292	4429	3935	3255	3759
2	20	4966	4518	4364	3847	4236
2	40	5099	4905	4531	4314	4592
2	60	5055	4449	4823	5056	4941
2	80	5240	4686	5227	5404	5000
3	0	4390	4344	3424	3565	3519
3	20	4913	4428	4260	3981	4117
3	40	5064	4669	4327	4405	4562
3	60	5340	4751	4926	4944	4615
3	80	5377	4379	4659	5603	4440
----- Resíduo de soja -----						
1	0	4405	3726	4118	4230	4189
1	20	5189	4250	4614	4628	4332
1	40	5584	3839	4767	5121	4678
1	60	5601	4400	5175	5385	5064
1	80	5513	4103	5128	5743	5261
2	0	4933	4075	3730	3982	3550
2	20	5679	4186	4038	4645	4089
2	40	5550	4351	4536	4725	4521
2	60	5393	4168	4865	5161	4484
2	80	6177	3771	5112	5110	4480
3	0	4993	4258	3513	3619	3522
3	20	5266	4080	3760	4367	4044
3	40	5592	3836	4228	4654	4041
3	60	6044	4012	4398	4954	4087
3	80	5553	3848	4603	5278	4501

APÊNDICE 10. Valor-P (relação entre o VALOR-F_{calculado} e o VALOR-F_{crítico}) da análise de variância para as variáveis avaliadas na LINHAS DE ESTUDO II. EEA/UFRGS, RS, 2006 e 2007.

Análise de variância	GI num.	GI den.	NDVI		N foliar		Colmos		N acumulado		Biomassa	
			2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
			----- nº m ⁻² -----		----- kg ha ⁻¹ -----		----- kg ha ⁻¹ -----		----- % -----		----- kg ha ⁻¹ -----	
bloco	3	3	0,1393	0,2416	0,443	0,7138	0,37	0,3222	0,4619	0,4784	0,6197	0,2551
resteva	1	3	0,1244	0,0085**	0,9513	0,7664	0,6274	0,7148	0,6669	0,3225	0,992	0,3732
cultivar	1	6	0,0002**	0,0361*	0,0025**	0,2266	0,1316	0,3223	0,2319	0,7547	0,0146*	0,7443
cultivar * resteva	1	6	0,9511	0,0848	0,5207	0,9078	0,7778	0,267	0,4701	0,4983	0,4501	0,4673
tratamentos	1	12	0,001**	<0,0001**	0,0054	0,1662	0,9835	0,4901	0,0712	0,9812	0,8559	0,5093
cultivar * tratamento	1	12	0,0084**	0,0879	0,0114*	0,4857	0,1498	0,0555	0,0797	0,0669	0,8811	0,0207*
tratamento * resteva	1	12	0,6398	0,0057**	0,3993	0,3699	0,2083	0,1135	0,7403	0,0046**	0,5525	0,0063**
cultivar * tratamento * resteva	1	12	0,2173	0,0059**	0,6842	0,9724	0,9927	0,1602	0,1555	0,0315*	0,3302	0,0244*

* Diferença entre médias significativa à 5% pelo F-teste.

** Diferença entre médias significativa à 1% pelo F-teste.

APÊNDICE 11. Valor dos graus de liberdade, soma dos quadrados e VALOR-F_{calculado} da análise de variância para as simulações avaliadas na LINHA DE ESTUDO II. EEA/UFRGS, RS, 2007.

Análise de variância	GL numerador	GL denominador	Resíduo de milho		Resíduo de soja	
			SQ	F-valor	SQ	F-valor
----- Cevada -----						
----- Solo exposto -----						
Blocos	3	6	0,005652	107,79**	0,0182727	59,41**
Tratamentos	2	6	0,0013721	26,17**	0,0019148	9,34*
----- Solo não-exposto -----						
Blocos	3	6	0,0020294	18,64**	0,0128228	82,41**
Tratamentos	2	6	0,0036781	50,68**	0,001242	11,97**
----- Trigo -----						
----- Solo exposto -----						
Blocos	3	6	0,0001885	0,5	0,0025459	50,64**
Tratamentos	2	6	0,0039831	15,97**	0,0011078	22,04**
----- Solo não-exposto -----						
Blocos	3	6	0,0008497	0,9	0,0029179	64,55**
Tratamentos	2	6	0,0052824	8,35*	0,0048774	161,84**

* Diferença entre médias significativo à 5% pelo F-teste.

** Diferença entre médias significativo à 1% pelo F-teste.

APÊNDICE 12. Valor dos graus de liberdade, soma dos quadrados e VALOR-F_{calculado} da análise de variância para a flutuação estacional (horas) avaliada na LINHA DE ESTUDO II. EEA/UFRGS, RS, 2007.

Análise de variância	GL numerador	GL denominador	Cevada		Trigo	
			SQ Resíduo de milho	F-valor	SQ Resíduo de soja	F-valor
----- Cevada -----						
----- Solo exposto -----						
Blocos	3	30	0,0512691	312,11**	0,01918176	189,59**
Horas	10	30	0,0026836	4,90**	0,00029350	2,90*
----- Solo não-exposto -----						
blocos	3	30	0,00730748	256,59**	0,01285822	188,07**
horas	10	30	0,00324065	34,14**	0,00038994	5,70**
----- Trigo -----						
----- Solo exposto -----						
Blocos	3	30	0,00156166	18,65**	0,01613758	108,93**
Horas	10	30	0,01152287	41,28**	0,00648551	13,13**
----- Solo não-exposto -----						
Blocos	3	30	0,00994179	304,72**	0,01753953	106,74**
Horas	10	30	0,00893105	82,12**	0,01204357	21,99**

* Diferença entre médias significativo à 5% pelo F-teste.

** Diferença entre médias significativo à 1% pelo F-teste.

APÊNDICE 13. Valores-críticos do modelo de determinação do potencial produtivo de trigo e cevada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), avaliados na LINHA DE ESTUDO III, para os resíduos de milho e soja. EEA/UFRGS, RS, 2006.

Classe de potencial produtivo da lavoura	Potencial relativo	Classificação do NDVI obtido na lavoura		
		Subestimado	Normal	Superestimado
----- Resíduo de milho -----				
Nula	0	<0,09	<0,13	<0,18
Baixa	0 - 0,25	0,10 - 0,43	0,14 - 0,45	0,19 - 0,47
Média	0,26 - 0,53	0,44 - 0,65	0,46 - 0,68	0,48 - 0,71
Alto	0,54 - 0,87	0,66 - 0,77	0,69 - 0,80	0,72 - 0,84
Muito alto	>0,88	>0,78	>0,81	>0,85
----- Resíduo de soja -----				
Nula	0,00	<0,26	<0,33	<0,39
Baixa	0 - 0,30	0,27 - 0,57	0,34 - 0,59	0,40 - 0,62
Média	0,31 - 0,57	0,58 - 0,72	0,60 - 0,75	0,63 - 0,79
Alto	0,58 - 0,89	0,73 - 0,80	0,76 - 0,83	0,80 - 0,87
Muito alto	>0,90	>0,81	>0,84	>0,88

APÊNDICE 14. Estatística descritiva das variáveis: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), biomassa acumulada na parte aérea relativa, rendimento relativo de grãos e diferença relativa, determinadas na área da lavoura. Victor Graeff, RS, 2006.

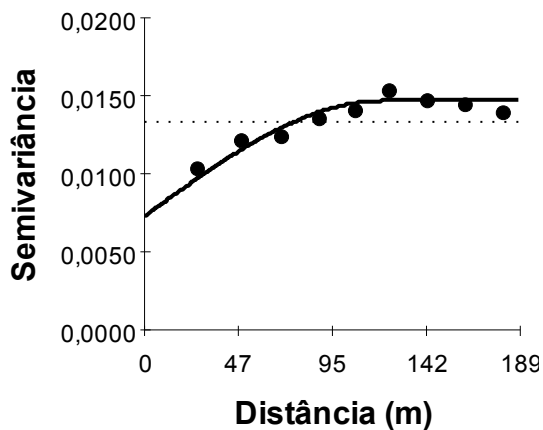
Observações ¹		Valor mínimo	Valor máximo	Média	Limites do IC ³	
Atípicas ²	Válidas				Inferior	Superior
----- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada -----						
----- n -----						
4	115	0,73	0,84	0,79	0,79	0,80
----- Biomassa relativa -----						
----- n -----				% -----		
4	115	0,29	0,86	0,58	0,53	0,60
----- Rendimento relativo de grãos -----						
2	103	0,26	0,79	0,54	0,51	0,56
----- Diferença relativa entre biomassa e rendimento de grãos -----						
2	103	-0,42	0,52	0,08	0,04	0,11

¹ O número total de observações obtidas nos dois momentos de amostragem é o somatório das observações atípicas mais válidas.

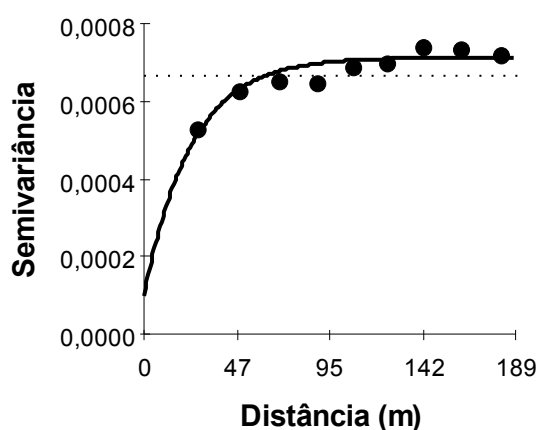
² Foram consideradas observações atípicas aquelas que apresentaram valores 1,5 vezes maiores e menores que o valor do percentil 75 (limite superior do intervalo interquartilico).

³ O Intervalo de confiança (IC) determina a zona de localização da média amostral com uma confiança de 95%.

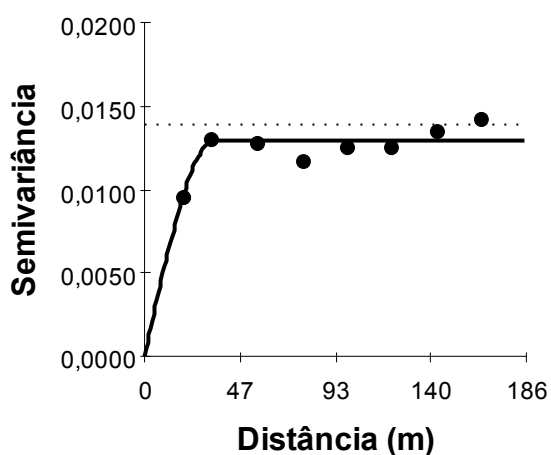
Apêndice 15.1. Biomassa relativa



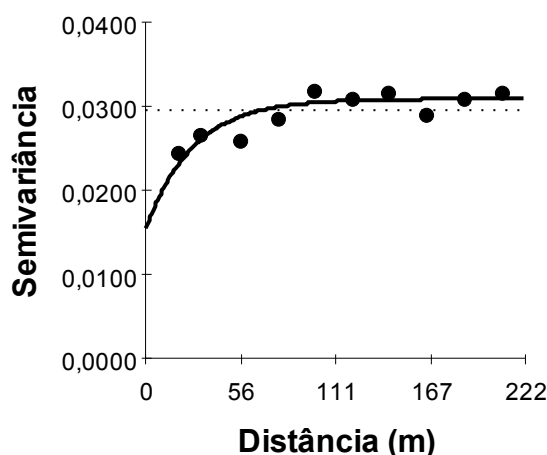
Apêndice 15.2. NDVI



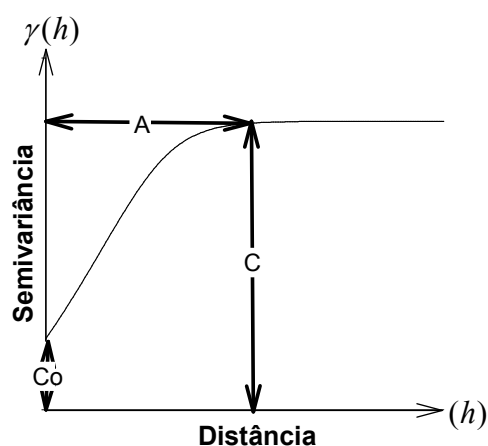
Apêndice 15.3. Rendimento relativo de grãos



Apêndice 15.4. Diferença relativa



Parâmetros do semivariograma teórico, segundo Camargo *et al.* (2004):



A (alcance): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.

C (patamar): deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras.

Co (efeito pepita): reflete as microestruturas não captadas pela menor escala da amostragem, erros de amostragem, de análises laboratoriais, etc.

APÊNDICE 15. Semivariogramas experimentais das variáveis determinadas e ajuste de modelos isotrópicos pelo método dos quadrados mínimos. Victor Graeff, RS, 2006.

APÊNDICE 16. Coeficiente de correlação e coeficientes da equação linear da associação entre os valores observados (y) e preditos pelos modelos isotrópicos (\hat{y}), obtidos através do procedimento de validação cruzada. Victor Graeff, RS, 2006.

$(r)^1$	Constante (a_0) ²	Coefficiente angular (a_1) ³
----- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada -----		
%		
38	0,24	0,70
----- Biomassa relativa -----		
45	0,07	0,88
----- Rendimento relativo de grãos -----		
32	0,18	0,67
----- Diferença relativa entre biomassa e rendimento de grãos -----		
29	0,03	0,66

¹ Coeficiente de correlação entre os valores observados (y) e os valores preditos (\hat{y}) pelo ajuste dos modelos isotrópicos. Quanto mais próximo de 100% for "r", maior a similaridade entre y e \hat{y} .

² Coeficiente da equação de regressão linear simples $\hat{y} = a_0 + a_1 * y$. Quanto mais próximo de 0 estiver a_0 , maior a similaridade entre y e \hat{y} .

³ Coeficiente da equação de regressão linear simples $\hat{y} = a_0 + a_1 * y$. Quanto mais próximo de 1 estiver a_1 , maior a similaridade entre y e \hat{y} .