

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DO TRIGO (*Triticum aestivum* L.) SUBMETIDA AO ESTRESSE HÍDRICO

LEAF AREA INDEX AND SPECTRAL RESPONSE OF WHEAT CROP UNDER WATER STRESS

Antonio Francisco Perrone Oviedo

Departamento de Geografia da Universidade de Taubaté

Bernardo F. T. Rudorff

Departamento de Sensoriamento Remoto – INPE

RESUMO

Medidas do índice de área foliar e da reflectância espectral do cultivar de trigo IAC-24 submetido ao estresse hídrico em diferentes estádios fenológicos foram analisadas com utilização do Plant Canopy Analyser, LAI-2000, e de radiometria de campo, durante a safra de 1996, na região de Taubaté, SP. Os fatores de reflectância foram obtidos na região do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético e transformados no índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Os dados radiométricos e do índice de área foliar foram analisados numa escala temporal, ao longo do ciclo da cultura, e o índice de área foliar expressou as condições do dossel, especialmente durante o período vegetativo. Os dados espectrais também manifestaram o efeito do estresse no vigor e condições do dossel. Períodos de estresse foram aparentes nos dados espectrais. O NDVI compensou as variações da intensidade solar, efeito do solo e geometria de visada, expressando melhor o efeito do estresse do que quando este foi analisado através das bandas simuladas do Landsat-TM. A energia refletida em determinados estádios fenológicos e em determinados comprimentos de onda pode ser relacionada com a produtividade. Conseqüentemente, dados espectrais, transformados em índices de vegetação, possuem grande potencial para serem utilizados em modelos de produtividade agrícola do trigo.

PALAVRAS-CHAVE: reflectância espectral, radiometria de campo, estresse hídrico

INTRODUÇÃO

As técnicas de sensoriamento remoto na agricultura têm apresentado grande potencial para a identificação de áreas de cultivo, bem como para estimar parâmetros biofísicos a serem utilizados em modelos de crescimento e produtividade agrícola (Bauer, 1985). Dada a característica sinótica dos dados de sensoriamento remoto, especialmente aqueles obtidos por sensores a bordo de satélites, pode-se estimar tais parâmetros relacionados à produtividade, que se manifestam em função da quantidade de radiação refletida ou emitida pela cultura e captada pelo sensor em diferentes faixas de comprimento de onda do espectro eletromagnético (Tucker et al., 1981).

A radiometria de campo tem sido uma técnica bastante utilizada para o estabelecimento dessas relações, pois permite obter medidas quase que diárias, ao longo do ciclo de crescimento das culturas sob condições favoráveis em termos de influência da atmosfera, quando comparada com o dado adquirido por sensores orbitais. Com frequência, a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) tem sido utilizada como modelo para esse tipo de estudo no Brasil (Rudorff et al., 1989; Moreira, 1997; Rudorff et al., 1997), pois as condições meteorológicas geralmente são favoráveis para a aquisição de dados espectrais durante a época do ano em que se cultiva o trigo.

Tucker (1979) concluiu que há uma estreita relação entre os índices de vegetação e as condições de crescimento da cultura do trigo, o que explica grande parte da variação que ocorre no rendimento dos grãos.

Tucker et al. (1981) avaliaram os índices de vegetação razão simples (SR) e da diferença normalizada (NDVI), na estimativa da matéria seca acumulada acima do solo na cultura do trigo, e concluíram que fatores adversos que afetam o crescimento e o desenvolvimento da cultura são evidentes no comportamento desses índices, se eles afetam tanto o conteúdo de clorofila quanto a fitomassa foliar verde. Períodos de estresse hídrico, nesses casos, são expressados espectralmente devido à redução na densidade de clorofila nas folhas. Os resultados obtidos pelo autor relatam a resposta de ambos os índices à ocorrência da precipitação, que finalizava períodos de estresse hídrico na cultura.

Rudorff et al. (1989) avaliaram as relações entre os índices de vegetação razão simples (SR) e da diferença normalizada (NDVI) e alguns parâmetros biofísicos a partir de medidas radiométricas, obtidas ao longo do ciclo da cultura, na região de Assis, São Paulo. Os resultados indicaram que o índice de vegetação obtido no estágio de emborrachamento e início do espigamento (pouco mais de 60 dias após o plantio) melhor se relaciona com a produtividade final, porém foram observadas também boas relações desde o estágio em que a cultura se encontrava em 30 a 40 dias após o plantio.

Parâmetros biofísicos, como o índice de área foliar, são comumente utilizados para monitorar as condições de crescimento da cultura agrícola. Estes parâmetros são utilizados separadamente ou combinados, para simular respostas da cultura ao seu microclima. Medidas radiométricas na faixa do visível e infravermelho do espectro eletromagnético podem ser utilizadas para obter estimativas rápidas e não-destrutivas destes parâmetros. Situações de estresse hídrico ou deficiência nutricional podem impor uma atividade biológica que resulte na redução da produção de biomassa. Esta condição afeta a arquitetura do dossel e seu regime no uso da radiação, que pode resultar em uma redução na absorção da PAR e, conseqüentemente, em um aumento do espalhamento dessa energia nesta região do espectro. Isto pode resultar num decréscimo na reflectância do infravermelho do dossel, devido à redução da fitomassa. Dessa forma, uma mudança na atividade biológica do dossel resulta numa mudança da resposta espectral.

Tucker (1979) estudou combinações das bandas do vermelho e do infravermelho próximo e concluiu que estas são muito sensíveis às variações do IAF, daí seu emprego em muitos dos índices espectrais. Asrar, Kanemasu & Yoshida (1985), baseados em análises teóricas e experimentos em condições de campo, obtiveram bons resultados na estimativa do IAF a partir do índice de vegetação NDVI. Os autores observaram variações no índice de área foliar em dosséis de trigo decorrentes das práticas culturais. Parcelas com suprimento adequado de água produziram índices de área foliar superiores e mantiveram os valores elevados por períodos mais longos, em comparação às parcelas submetidas a estresse hídrico. Outras práticas como época e densidade de plantio também afetam o desenvolvimento do dossel, podendo assim afetar suas características espectrais.

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento espectral - fator de reflectância nas bandas TM_3 e TM_4 , índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) – e o índice de área foliar (IAF) na cultura do trigo submetida ao estresse hídrico em diferentes estádios fenológicos.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido, sob condições de campo, na área experimental da Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. O cultivar de trigo IAC-24 foi cultivado numa densidade de plantio de 400 plantas m⁻², em parcelas onde foram adaptadas coberturas de plástico transparente, para simular condições de estresse hídrico durante determinados estádios fenológicos. Ao longo do ciclo da cultura foram tomadas medidas espectrais e do índice de área foliar. O estudo foi conduzido entre os meses de abril e agosto de 1996, com data do plantio em 29/04/96 e colheita em 26/08/96 e 03/09/96. O delineamento utilizado foi de um experimento casualizado em blocos com 3 repetições. Foi mantida uma bordadura de 5 m entre as unidades experimentais principais. Os tratamentos para o estresse hídrico consistiram da testemunha e de 4 períodos de estresse hídrico (supressão da água fornecida pela precipitação e irrigação) em diferentes estádios fenológicos durante o ciclo da cultura, ou seja: a) EH1 - Testemunha; suprida com água em reposição de 100% da demanda evaporativa durante todo o ciclo; b) EH2 - Estresse hídrico no período do perfilhamento até o início do emborrachamento; c) EH3 - Estresse do emborrachamento até o início do florescimento; d) EH4 - Estresse do florescimento até o completo enchimento dos grãos; e) EH5 - Estresse da maturação fisiológica até a colheita. A caracterização dos estádios fenológicos de crescimento da cultura foi feita com base na escala de Feeks modificada por Large (Scheeren, 1986). O manejo da irrigação foi conduzido conforme recomendações do

Boletim 216 (CATI, 1994). O monitoramento da simulação do estresse hídrico foi feito com base no balanço hídrico modificado (Braga, 1982).

As medidas radiométricas do dossel da cultura do trigo foram obtidas ao longo do ciclo da cultura, conforme as condições meteorológicas permitiram, utilizando-se o espectrorradiômetro portátil de campo modelo SE-590 (Spectron Inc., EUA), fixado num mastro a cerca de 3m sobre a cultura, com um ângulo de visada de 15°, que permitiu obter a radiância de uma superfície de aproximadamente 0,5m². Oviedo (1999) estabelece os procedimentos adotados para as medidas radiométricas. As medidas obtidas com o espectrorradiômetro foram transformadas em reflectância espectral para as faixas espectrais correspondentes ao sensor TM na banda 3 (TM₃, 630 a 690 nm) e na banda 4 (TM₄, 760 a 900 nm), com o auxílio do programa ESPECTRO (Steffen, 1995). Os valores de reflectância nestas bandas foram utilizados para o cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada – NDVI (Tucker, 1979).

As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas por meio de um método não destrutivo, utilizando-se um equipamento denominado Plant Canopy Analyzer, modelo LAI-2000 (LI-COR Inc., USA). O equipamento determina o IAF a partir de medidas da radiação solar, preferencialmente difusa, que chega acima e abaixo do dossel da cultura, para cinco diferentes ângulos, simultaneamente. As medidas foram obtidas no início da manhã, com três repetições em posições variadas dentro das parcelas.

Os resultados foram analisados utilizando-se o pacote estatístico desenvolvido pela Statistical Analysis Systems Institute Inc. (1991). Foi realizada a análise de variância (ANOVA) apropriada ao delineamento experimental para cada campanha radiométrica e do índice de área foliar. A diferença entre as médias dos tratamentos foi analisada pelo teste “Duncan’s Multiple Range Test” para as variáveis: fator de reflectância nas bandas TM₃ e TM₄, índice de vegetação NDVI, e índice de área foliar; sempre que o teste F foi significativo ao nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o balanço hídrico que monitorou a simulação do estresse hídrico. Os resultados indicam que o tempo gasto para atingir o primeiro dia seco, ou estresse efetivo, nas parcelas submetidas ao estresse hídrico durante o perfilhamento (EH2), emborrachamento (EH3), enchimento de grãos (EH4) e maturação fisiológica (EH5) foi de 25, 14, 10 e 17 dias, respectivamente. O número de dias secos nas parcelas submetidas ao estresse durante os períodos supracitados foi de 8, 9, 8 e 13, respectivamente.

Tabela 1 - Síntese do balanço hídrico para o fator estresse hídrico

nível de água	ETM (mm/dia)	duração dos níveis de água	dias para ocorrência do 1º dia seco	dias secos	déficit hídrico (mm)	lâmina d’água suprimida (mm)
EH2	0,82	33	25	8	7,04	55,7
EH3	1,27	23	14	9	8,9	58,8
EH4	1,99	18	10	8	9,62	45,8
EH5	0,85	30	17	13	5,6	49,2

A diferença entre os dias necessários para ocorrência do primeiro dia seco está relacionada aos diferentes estádios fenológicos, que demandam água em taxas diferenciadas, bem como às condições meteorológicas durante o período em que a cultura deixou de receber água. Pode-se afirmar que, qualitativamente, os períodos de estresse hídrico foram da mesma magnitude para todos os tratamentos.

Tabela 2 - Efeito do fator estresse hídrico no IAF para as 4 campanhas

Estresse hídrico	IAF 1 (02/06) Afilhamento	IAF 2 (04/07) Emborrachamento	IAF 3 (22/07) Enchimento de Grãos	IAF 4 (06/08) Maturação Fisiológica
EH1	3,09 a	3,39 a	3,34 a	2,83 ab
EH2	1,39 b	1,98 b	2,65 b	2,45 b
EH3	2,88 a	3,09 a	2,91 b	2,63 ab
EH4	2,66 a	3,34 a	3,38 a	2,92 a
EH5	2,29 ab	3,27 a	3,50 a	2,77 ab
	ANOVA	Valores F		
Estresse hídrico	3,23 ns	8,94 **	3,78 *	2,61 NS
CV (%)	26,14	11,36	10,14	7,19

Para as medições do índice de área foliar (IAF), foram realizadas quatro campanhas durante o ciclo da cultura: a) perfilhamento (dia juliano 154), b) emborrachamento (dia juliano 186), c) florescimento/enchimento de grãos (dia juliano 204) e maturação fisiológica (dia juliano 219). Os resultados para o IAF (Tabela 2) indicam que o efeito do estresse hídrico foi significativo quando a cultura sofreu estresse hídrico durante o perfilhamento, com reduções de 25; 41,6 e 20,6% em relação à testemunha, nas campanhas realizadas durante os estádios de perfilhamento, emborrachamento e enchimento de grãos. Quando o estresse hídrico foi simulado durante o estágio de emborrachamento, a campanha do IAF realizada durante este estágio fenológico (66 dias após o plantio) não observou variação significativa em relação à testemunha. O efeito do estresse durante o emborrachamento só foi observado posteriormente, na campanha realizada durante o estágio de enchimento de grãos (84 dias após o plantio), apresentando uma redução de 12,9% em relação à testemunha.

Esta redução no IAF pode ser atribuída a alterações nas atividades metabólicas decorrentes da deficiência hídrica durante o crescimento celular e expansão foliar, conforme relataram Gardner; Pearce; Mitchell (1985). O estresse hídrico durante estes estádios fenológicos fez com que o potencial de água nos tecidos meristemáticos promovesse um decréscimo no potencial de pressão abaixo do necessário para o crescimento celular, conseqüentemente reduzindo a área foliar (Gardner, Pearce & Mitchell 1985). Já nos estádios de enchimento de grãos (EH4) e maturação fisiológica (EH5), o estresse hídrico não alterou os valores do IAF em relação à testemunha, pois nestes estádios as folhas já estão completamente formadas e não respondem às variações na produtividade agrícola.

A Tabela 3 apresenta a data, horário, nível de água, condições do vento e cobertura de nuvens para cada campanha radiométrica. O elevado número de campanhas durante o nível EH5 deu-se em função da determinação do momento em que a planta modifica sua atividade fotossintética, que se reflete no comportamento espectral na região do vermelho e infravermelho próximo, indicando o início do estágio de maturação fisiológica. O tempo médio por campanha foi de 40 minutos, e o tempo médio entre campanhas foi de quatro dias. A placa de referência foi calibrada, em relação a um padrão, na ocasião das campanhas de número 1, 3, 7 e 12.

Tabela 3 - Lista das campanhas radiométricas executadas no campo experimental de trigo - safra 1996

Missão	Dia Juliano	Data	Nível de Água	Horário	Velocidade do Vento (m/s), Céu
1	130	09/05	EH2	9:45	1.0, céu limpo sem nuvens
2	136	15/05	EH2	10:00	0.7, céu limpo sem nuvens
3	151	30/05	EH2	11:15	1.0, céu limpo sem nuvens
4	156	04/06	EH2	10:22	1.3, céu limpo sem nuvens
5	163	11/06	EH2	9:30	1.0, céu limpo sem nuvens
6	167	15/06	EH2	10:30	0.4, céu limpo sem nuvens
7	169	17/06	EH2	10:20	0.2, céu limpo sem nuvens
8	177	25/06	EH3	9:45	1.1, céu limpo sem nuvens
9	183	01/07	EH3	9:15	2.3, céu limpo sem nuvens
10	184	02/07	EH3	9:00	1.2, céu limpo sem nuvens
11	199	17/07	EH4	10:45	0.6, céu limpo sem nuvens
12	201	19/07	EH4	10:40	1.3, céu limpo sem nuvens
13	207	25/07	EH4	9:30	1.0, céu limpo sem nuvens
14	215	02/08	EH5	10:40	1.5, céu limpo sem nuvens
15	216	03/08	EH5	10:40	1.2, céu limpo sem nuvens
16	217	04/08	EH5	10:15	0.3, céu limpo sem nuvens
17	218	05/08	EH5	10:15	1.1, céu limpo sem nuvens
18	219	06/08	EH5	10:30	1.6, céu limpo sem nuvens
19	220	07/08	EH5	10:50	0.8, céu limpo com brumas
20	221	08/08	EH5	10:30	0.9, céu limpo com brumas
21	227	14/08	EH5	9:45	1.8, céu limpo sem nuvens
22	235	22/08	EH5	10:35	0.9, céu limpo sem nuvens

Durante os 119 dias em que a cultura do trigo permaneceu no campo foi possível realizar 22 campanhas radiométricas, entre 09/05 (10 dias após o plantio), época em que a cultura apresentava-se com três folhas e iniciando o estágio de perfilhamento, e 22/08 (115 dias após o plantio), quando o trigo estava maduro. As Tabelas 4 a 6 apresentam a análise de variância e o teste estatístico de Duncan, em onze campanhas selecionadas, para as bandas TM_3 , TM_4 e para o índice de vegetação da diferença normalizada – NDVI, respectivamente.

Os resultados indicam que o estresse hídrico teve um efeito significativo no NDVI em todas as campanhas selecionadas, reduzindo o valor do NDVI, em relação à testemunha. Pode-se observar ainda que a diferenciação entre os níveis de água, que sofrem períodos de estresse hídrico em estádios diferenciados, e a testemunha, vai ocorrendo à medida que a irrigação é suspensa (Tabela 6). A melhor relação entre o NDVI e o estresse hídrico foi alcançada nas campanhas realizadas durante os estádios de emborrachamento e enchimento de grãos, quando a cultura está com aproximadamente 60 e 80 dias após o plantio, respectivamente. Porém, foram observadas também boas relações desde o estágio em que a cultura se encontrava com 30 a 40 dias após o plantio. Após o período de estresse hídrico, as parcelas mantêm um comportamento espectral do NDVI diferenciado da testemunha, bem como em algumas campanhas é possível identificar o período em que a cultura sofreu o estresse (especialmente as campanhas realizadas 47, 64, 87 e 96 dias após o plantio).

Com relação à sensibilidade do NDVI às variações na exposição e tonalidade do solo, pode-se observar que o NDVI apresenta um comportamento adequado, especialmente durante o desenvolvimento vegetativo, quando a cobertura do solo não atingiu o valor máximo. Analisando o balanço hídrico e a Tabela 6, observa-se que, para os estádios de perfilhamento, enchimento de grãos e maturação fisiológica, a diferenciação do NDVI ocorreu antes do primeiro dia seco, ou estresse efetivo.

Considerando que os valores do NDVI são obtidos a partir dos fatores de reflectância nas bandas TM_3 e TM_4 , a redução nos valores do NDVI pode ser avaliada com base no comportamento espectral na região do visível (Tabela 4) e infravermelho próximo (Tabela 5). Porém, o efeito do estresse hídrico é mais pronunciado no comportamento do NDVI do que nas bandas separadas, o que se deve à redução na interferência da resposta espectral do solo e sombra, conforme abordaram Asrar, Kanemasu & Yoshida (1985).

A cultura do trigo submetida ao estresse hídrico durante o perfilhamento apresentou uma redução no NDVI por duas razões: a) aumento da reflectância na banda TM_3 decorrente da redução do IAF, redução no teor de clorofila e influência da resposta espectral do solo (Tabela 4); b) diminuição da reflectância na banda TM_4 decorrente da mudança na estrutura interna das folhas, redução do IAF e fitomassa, e influência do solo que apresenta tonalidade mais clara decorrente da perda de água (Tabela 5). Com este comportamento concordam Asrar, Myneni & Kanemasu (1989) e Guyot (1990). Observa-se que, próximo à colheita, as parcelas submetidas ao estresse no perfilhamento recuperam o comportamento espectral na banda TM_3 e no NDVI ao nível da testemunha.

O estresse hídrico ocorrido durante o emborrachamento apresentou um aumento da reflectância na banda TM_3 que pode ser atribuído à redução do IAF e fitomassa, fechamento estomatal, redução no teor de clorofila e senescência precoce das folhas (Asrar, Myneni & Kanemasu, 1989) (Tabela 4). Após o período de estresse hídrico, as parcelas adquirem um comportamento espectral na banda TM_3 semelhante à testemunha. Observa-se que a diferença significativa do NDVI, para este nível de água e a testemunha, expressou melhor o efeito do estresse hídrico do que quando este foi analisado através do fator de reflectância nas bandas isoladas (Wiegand et al., 1991).

O estresse hídrico durante o enchimento de grãos teve um efeito significativo na reflectância da banda TM_3 , promovendo um aumento em relação à testemunha, o que pode ser atribuído ao fechamento estomatal e senescência precoce de folhas (Guyot, 1990). Após o período de estresse hídrico, as parcelas apresentaram um comportamento espectral na banda TM_3 diferenciado da testemunha até o estágio fenológico de maturação fisiológica - grãos leitosos, e para o comportamento do NDVI as parcelas apresentam um comportamento diferenciado da testemunha até o estágio de maturação fisiológica - grãos em massa. Tal como foi discutido no estágio de emborrachamento, o NDVI foi um indicador mais adequado dos efeitos do estresse hídrico quando comparado com as bandas individuais.

A cultura do trigo submetida ao estresse hídrico durante a maturação fisiológica apresentou um aumento da reflectância na banda TM_3 decorrente da senescência das folhas, degeneração da clorofila e interferência da resposta espectral do solo (Asrar et al., 1989; Guyot, 1990). Neste estágio fenológico, o comportamento espectral na banda TM_3 e no NDVI foram similares (Tabelas 4 e 6).

Nas duas últimas campanhas radiométricas, a relação entre o comportamento espectral nas bandas TM_3 , TM_4 e no NDVI e a detecção dos períodos de estresse hídrico é baixa e tende a diminuir à medida que se aproxima a época da colheita. Estes resultados concordam com os estudos de Rudorff et al. (1989).

Tabela 4 - Efeito do fator estresse hídrico sobre o fator de reflectância na banda TM_3 (simulada) nas 11 campanhas radiométricas (dia juliano, data, dias após o plantio e estágio fenológico) selecionadas

Tratamento	156 04/06 (36) Perfilhamento	167 15/06 (47) Perfilhos formados	169 17/06 (49) Final do perfilhamento	177 25/06 (57) Folha bandeira visível	184 02/07 (64) Embomacha- mento	199 17/07 (79) 3/4 do Espigamento	201 19/07 (81) Final do florescimento	207 25/07 (87) Grãos aquosos	216 03/08 (96) Grãos leitosos	218 05/08 (98) Grãos em massa	235 22/08 (115) Maturação de colheita
Estresse Hídrico											
EH1	4,60 b	1,86 b	1,53 b	1,80 b	1,53 b	1,86 ab	1,96 c	2,10 b	3,56 b	2,90 bc	7,80 ab
EH2	8,66 a	4,46 a	2,93 a	2,90 a	1,50 b	2,20 a	2,66 ab	2,06 b	3,70 b	2,76 c	6,83 b
EH3	5,16 b	1,96 b	1,70 b	1,96 b	1,96 a	2,06 ab	2,33 bc	2,43 b	4,06 ab	3,73 a	6,90 b
EH4	5,63 b	2,03 b	1,66 b	1,76 b	1,60 b	2,20 a	2,80 a	3,03 a	4,43 a	3,33 ab	7,33 ab
EH5	5,23 b	1,96 b	1,66 b	1,73 b	1,56 b	1,83 b	1,96 c	2,16 b	4,36 a	3,46 a	8,16 a
ANOVA											
Estresse hídrico	25,86 **	35,66 **	6,79 *	22,53 **	9,56 **	3,08 +	8,75 **	8,89 **	4,81 *	7,01 **	3,35 +
CV (%)	9,36	13,24	20,33	8,84	6,51	8,56	9,63	9,92	7,60	8,09	7,34

Nível de significância estatística: ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; + $p < 0,1$; ns não significativo. Níveis de água do fator estresse hídrico com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 5 - Efeito do fator estresse hídrico sobre o fator de reflectância na banda TM_4 (simulada) nas 11 campanhas radiométricas (dia juliano, data, dias após o plantio e estágio fenológico) selecionadas

Tratamento	156 04/06 (36) Perfilhamento	167 15/06 (47) Perfilhos formados	169 17/06 (49) Final do perfilhamento	177 25/06 (57) Folha bandeira visível	184 02/07 (64) Embomacha- mento	199 17/07 (79) 3/4 do Espigamento	201 19/07 (81) Final do florescimento	207 25/07 (87) Grãos aquosos	216 03/08 (96) Grãos leitosos	218 05/08 (98) Grãos em massa	235 22/08 (115) Maturação de colheita
Estresse Hídrico											
EH1	40,73	31,00 a	30,13 a	30,10 a	28,16 a	25,56 a	25,83 a	28,90 a	21,60	19,76	15,93 b
EH2	41,83	24,73 b	23,03 b	18,20 c	16,73 b	21,06 b	22,53 b	24,26 b	22,20	20,13	18,63 a
EH3	41,56	29,13 a	31,00 a	26,70 a	27,88 a	23,86 a	24,66 a	28,10 a	22,06	20,90	15,03 b
EH4	48,06	31,56 a	31,36 a	28,56 ab	28,33 a	24,30 a	24,80 a	29,83 a	22,23	17,53	14,96 b
EH5	43,53	29,06 a	30,60 a	27,20 b	27,46 a	24,56 a	24,96 a	26,80 ab	20,30	17,56	15,70 b
ANOVA											
Estresse hídrico	0,89 ns	4,59 *	8,43 **	31,34 **	44,82 **	9,14 **	8,36 **	4,04 **	1,04 ns	2,24 ns	4,26 *
CV (%)	12,50	7,44	7,13	5,48	5,05	4,05	2,97	6,75	6,36	9,31	7,85

Nível de significância estatística: ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; + $p < 0,1$; ns não significativo. Níveis de água do fator estresse hídrico com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 6 - Efeito do fator estresse hídrico sobre o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) nas 11 campanhas radiométricas (dia juliano, data, dias após o plantio e estágio fenológico) selecionadas

Treatment	156 04/06 (36) Perfilhamento	167 15/06 (47) Perfilhos formados	169 17/06 (49) Final do perfilhamento	177 25/06 (57) Folha bandeira visível	184 02/07 (64) Erborachamento	199 17/07 (79) 3/4 do Espigamento	201 19/07 (81) Final do florescimento	207 25/07 (87) Grãos aquosos	216 03/08 (96) Grãos leitosos	218 05/08 (98) Grãos em massa	235 22/08 (115) Maturação de colheita
Estresse Hídrico											
EH1	0,79a	0,88a	0,90a	0,88a	0,89a	0,86a	0,85a	0,86a	0,72a	0,74a	0,34b
EH2	0,65b	0,69b	0,77b	0,72b	0,83c	0,81c	0,78d	0,84b	0,71ab	0,75a	0,46a
EH3	0,77a	0,87a	0,89a	0,86a	0,86b	0,84ab	0,82bc	0,84b	0,68abc	0,69b	0,37b
EH4	0,78a	0,87a	0,89a	0,88a	0,89a	0,83bc	0,79cd	0,81c	0,66bc	0,67b	0,34b
EH5	0,78a	0,87a	0,89a	0,88a	0,89a	0,86ab	0,85ab	0,85ab	0,64c	0,66b	0,31b
ANOVA											
Estresse hídrico	11,02 **	21,32 **	23,70 **	55,68 **	46,03 **	6,93 **	12,57 **	8,41 **	4,91 *	11,83 **	10,12 **
CV (%)	4,19	3,75	2,27	1,90	0,75	1,69	1,88	1,27	3,46	2,88	8,39

Nível de significância estatística: ** $p < 0,01$ e * $p < 0,05$. Níveis de água do fator estresse hídrico com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade

CONCLUSÕES

O índice de área foliar mostrou-se um parâmetro eficiente para o monitoramento das condições do dossel, especialmente durante o período vegetativo. Este parâmetro pode ser utilizado em modelos de crescimento agrícola e modelos de interação biosfera-atmosfera, visando monitorar a variabilidade temporal que determina a interação do dossel com a radiação solar e, conseqüentemente, modular a produtividade agrícola e os fluxos de superfície.

O uso de técnicas de sensoriamento remoto, especialmente radiometria de campo, demonstrou ser uma ferramenta eficiente para a avaliação das condições da cultura do trigo submetida ao estresse hídrico em diferentes estádios fenológicos. A alteração na morfologia, fisiologia e estrutura do dossel agrícola, decorrente do efeito do estresse hídrico, alterou o comportamento espectral do dossel, o que se fez notar a partir do fator de reflectância bidirecional espectral.

Pode-se afirmar que as bandas espectrais TM_3 e TM_4 do LANDSAT são adequadas para a detecção e monitoramento das condições fisiológicas em culturas agrícolas. O fator de reflectância nas bandas TM_3 e TM_4 transformado no índice de vegetação NDVI expressou melhor o efeito do estresse hídrico do que quando foi analisado através do fator de reflectância nas bandas isoladas. A análise temporal do NDVI permite detectar e monitorar condições de estresse e crescimento em áreas de cultivo de trigo.

As épocas ideais para aquisição de imagens ou campanhas radiométricas para o monitoramento da cultura são 36, 64 e 81 dias após o plantio. Os resultados obtidos são encorajadores, pois mostram que os dados espectrais podem ser obtidos durante um período bastante amplo (35 a 80 dias após o plantio), permitindo avaliar as condições de crescimento e estimar a produtividade com boa antecedência à colheita.

ABSTRACT

The leaf area index and the spectral reflectance measurements of the IAC-24 variety of wheat under water stress in different phenological stages was analyzed using the Plant Canopy Analyzer, LAI-2000, and field radiometry throughout the crop year of 1996, in the region of Taubaté, SP. Reflectance factors were measured in the visible and near infrared portion of the electromagnetic spectrum and transformed into normalized difference vegetation index (NDVI). The leaf area index and radiometric data were analysed multitemporally, and the former were

found to be related to condition of the plant canopy, specially during the vegetative stages. Also, the spectral data were found to be highly related to vigor and condition of the plant canopy. Periods of water stress were readily apparent in the spectral data. NDVI data compensated for variations in solar intensities, soil background and view geometry and expressed the water stress effect better than the Landsat-TM single band simulated. The reflected energy at certain stages of the crop development and at certain wavelength bands could be well related to the grain yield. Therefore, spectral data, transformed into vegetation indices, have great potential to be used in yield models for wheat.

KEY-WORDS: spectral reflectance, field radiometry, water stress

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASRAR, G.; KANEMASU, E.T.; YOSHIDA, M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing of Environment*, n.17, p.1-11, 1985.

ASRAR, G.; MYNENI, R.B.; KANEMASU, E.T. Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements. In: ASRAR, G. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. John Wiley & Sons: New York, 1989. p. 252-296.

BAUER, M.E. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. In: Proceedings of the IEEE, v.73, n.6, p.1071-1085, 1985.

BRAGA, H.J. *Caracterização da seca agrônômica através de novo modelo de balanço hídrico, na região de Laguna, litoral sul do estado de Santa Catarina*. Piracicaba (Tese de Mestrado - ESALQ/USP). 157p.,1982.

COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL - CATI. *Recomendação da comissão técnica de trigo para 1994*. Campinas, CATI, Boletim 216. 1994. 74p.

GARDNER, P.F.; PEARCE, R.B.; MITCHELL, R.L. *Physiology of crop plants*. Iowa: Iowa State Univ. Press. 1985. 337p.

GUYOT, G. Optical properties of vegetation canopies. In: STEVEN, M.D.A.; CLARK, J.A., ed. *Applications of remote sensing in agriculture*. London, Butterworths,1990 cap. 2, p. 19-43.

MOREIRA, M.A. *Deficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos*. ESALQ/USP (Tese doutorado), Piracicaba. 142 p., 1997.

OVIEDO, A. F. P. Efeito interativo do estresse hídrico e da densidade de plantio na radiação absorvida e produção de biomassa em áreas de cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.). Dissertação de mestrado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. USP, São Paulo. 140 p., 1999.

RUDORFF, B.T.F. et al. *Relatório da campanha de medidas radiométricas do trigo na região de Assis - safra 1988*. São José dos Campos, INPE (INPE-4949-rpe/598),1989.

RUDORFF, B.F.T. et al. *Efeito do nitrogênio e do deficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo*. CD-ROM Simp. Latino-Americano Percepção Remota, Mérida, Venezuela., 1997.

SCHEEREN, P.L. *Informações sobre o trigo*. Centro Nacional de Pesquisa de trigo. EMBRAPA, CNPT, Passo Fundo, RS,1986, 36 p.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEMS INSTITUTE INC. SAS System for linear models. Third Edition, Cary, NC: SAS Institute Inc., 329 p.,1991.

STEFFEN, C.A. Reflectância. São José dos Campos, INPE (INPE-5638-PUD/070).1995. 40 p.

TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, n.8, v.2, p.127-150, 1979.

TUCKER, C.J. et al. Remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, n.11, p.171-189, 1981.

WIEGAND, C. L. et al. Vegetation indices in crop assessment. *Remote Sensing of Environment*, n.35, p.105-119, 1991.