

Eficiência de uso do Nitrogênio em cultivares modernas de trigo

Nitrogen use efficiency in modern wheat cultivars

Matheus Henrique Todeschini, Anderson Simionato Milioli, Diego Maciel Trevizan, Elesandro Bornhofen, Taciane Finatto, Lindolfo Storck, Giovani Benin*

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Pato Branco (PR), Brasil.

RESUMO: A eficiência de uso do Nitrogênio (EUN) é definida como a capacidade de determinado genótipo em aproveitar o Nitrogênio (N) aplicado e transformá-lo em fitomassa e grãos. O objetivo deste estudo foi avaliar 12 cultivares de trigo quanto à EUN e seus componentes. O experimento foi conduzido em ambiente controlado, em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. Doze cultivares de trigo foram submetidas a diferentes doses de N (0, 80, 160 e 240 kg de N·ha⁻¹). Os dados foram submetidos a análise de variância, comparação múltipla de médias, regressão polinomial e análise de trilha. A eficiência de remobilização do Nitrogênio (ERN) foi o principal componente da EUN das cultivares avaliadas, tanto na condição de baixa quanto na de alta oferta de adubação nitrogenada. Na média das cultivares, a eficiência de utilização do Nitrogênio (EUtN) apresentou tendência de redução à medida que se elevou a oferta de N, tendendo à estabilização na dose de 231 kg de N·ha⁻¹. As cultivares de trigo Mirante, TBIO Itaipu, BRS Parrudo e TBIO Iguaçu foram as mais eficientes no uso do N, e as duas primeiras também foram eficientes em remobilizar o N da fitomassa para os grãos.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*, nutrição com nitrogênio, análise de trilha, clorofila, rendimento.

ABSTRACT: The nitrogen use efficiency (NUE) is defined as the capacity of a given genotype in take advantage of the applied nitrogen (N) and transform it in biomass and grains. The objective of this study was to evaluate 12 wheat cultivars as to the NUE and its components. The experiment was conducted in a controlled environment, in a randomized block design with three replications. Twelve wheat cultivars were submitted to four N supply levels (0, 80, 160 and 240 kg of N·ha⁻¹). The data were submitted to analysis of variance, means multiple comparison, polynomial regression, and path analysis. The nitrogen remobilization efficiency (NRE) was the main NUE component of the evaluated cultivars, in both low and high conditions of nitrogen fertilization. In the cultivars average, the nitrogen utilization efficiency (NUtE) presented reduction tendency as the N supply was increased, tending to stabilization at the dose of 231 kg of N·ha⁻¹. The wheat cultivars Mirante, TBIO Itaipu, BRS Parrudo, and TBIO Iguaçu were the most efficient on the N use, and the first two were also efficient in remobilizing the N from the phytomass to the grains.

Key words: *Triticum aestivum*, nitrogen nutrition, path analysis, chlorophyll, yield.

*Autor correspondente: benin@utfpr.edu.br

Recebido: 17 Ago. 2015 – Aceito: 21 Nov. 2015

INTRODUÇÃO

O Nitrogênio (N) representa o nutriente mais limitante para a produção de trigo (Pan et al. 2006). Devido a isso e aos possíveis problemas ambientais de seu uso, a eficiência de uso do N (EUN), calculada através da razão entre o rendimento de grãos (RG) e a quantidade do nutriente fornecida pelo fertilizante (Moll et al. 1982; Cormier et al. 2013; Dai et al. 2013), representa um caractere de grande importância na produção sustentável do grão (Asplund et al. 2014).

A adubação nitrogenada mineral representa um custo significativo na produção do trigo e pode causar impactos negativos no ambiente através da lixiviação e emissões de N_2O (Cui et al. 2014). Práticas agronômicas que ajudem o agricultor a elevar a produtividade e diminuir os custos de produção devem ser estudadas para garantir a sustentabilidade agrícola (Kaneko et al. 2010). Nesse sentido, estudos indicam que o desenvolvimento e utilização de cultivares de trigo com maior EUN podem contribuir para reduzir os montantes de N aplicados, sem restringir os ganhos na produtividade de grãos (Barraclough et al. 2014; Gaju et al. 2014).

A busca por cultivares mais eficientes no uso do N é um dos principais objetivos dos programas de melhoramento genético de trigo (Sadras e Lemaire 2014). Os principais componentes da EUN são a eficiência de absorção do N (EAN), a eficiência de utilização do N (EUtN) e a eficiência de remobilização do N (ERN) (Le Gouis et al. 2000). A EAN representa a capacidade das plantas em absorver o N disponível do solo. A EUtN é definida como a relação entre o rendimento da cultura e o N total absorvido pela planta (N nos grãos + N na fitomassa), ou seja, essa medida indica que o rendimento de grãos obtido para cada unidade de N absorvido pela planta. Em adição, a eficiência de remobilização do N (ERN) representa a capacidade das plantas em translocar o N após a antese da parte vegetativa para os grãos. Cultivares com uma maior ERN tendem a acelerar a senescência e aumentar os níveis de N nos grãos (Gaju et al. 2014).

Há relatos de que a EUN em trigo é inferior a 60% (Haile et al. 2012; Hawkesford 2012; Duan et al. 2014). Rahman et al. (2011) indicam valores entre 28,8 e 40,0 $kg_{grãos}$ por $kg_{N_{aplicado}}$, com dependência do efeito de cultivares e doses de N, as quais variaram de 80 a 120 kg de $N \cdot ha^{-1}$. A variabilidade de resposta de cultivares modernas quanto à EUN tem sido atribuída à EAN (Sadras e Lemaire 2014), à EUtN (Barraclough et al. 2010) e à ERN (Kichey et al. 2007; Pask et al. 2012; Guo

et al. 2014). O acúmulo de biomassa (Giambalvo et al. 2010) e o teor de clorofila foliar (Wani et al. 2011; Silva et al. 2014) são caracteres que têm sido associados à EUN e, portanto, podem ser utilizados na seleção indireta de cultivares mais eficientes no aproveitamento desse nutriente.

As primeiras estações de pesquisa com a cultura do trigo datam de 1919 (Caierão et al. 2014) e foram as responsáveis pelo desenvolvimento de cultivares pioneiros, reconhecidamente importantes para a triticultura brasileira. Avaliando uma série histórica de cultivares brasileiras, desenvolvidas entre 1940 e 2010, Beche et al. (2014) observaram que as cultivares modernas são mais eficientes no uso de N e mais tolerantes a ambientes de baixa disponibilidade de N em comparação com as cultivares pioneiras. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar cultivares de trigo modernas quanto à EUN e seus componentes, a fim de constatar a existência de variabilidade genética, útil para alavancar maiores progressos genéticos nos próximos ciclos de melhoramento.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no período de Maio a Outubro de 2013 em Pato Branco, no Estado do Paraná. Foram avaliadas 12 cultivares de trigo, desenvolvidas por diferentes programas de melhoramento e com expressiva área semeada nas safras agrícolas de 2012 e 2013 na Região Sul do Brasil: BRS Gaivota (Embrapa Trigo – 2012), BRS Gralha Azul (Embrapa Trigo – 2012), BRS Parrudo (Embrapa Trigo – 2013), BRS Tangará (Embrapa Trigo – 2007), CD 150 (Coodetec – 2009), Fcep Cristalino (CCGL Fcep – 2006), Fcep Raízes (CCGL Fcep – 2007), Mirante (OR/Biotrigo Genética – 2009), TBIO Iguazu (Biotrigo Genética – 2011), TBIO Itaipu (Biotrigo Genética – 2010), TBIO Mestre (Biotrigo Genética – 2013) e Topázio (OR Sementes – 2012).

O desempenho das cultivares foi avaliado sob quatro doses de N: 0 (controle), 3,7 (média oferta de N), 7,5 e 11,3 (alta oferta de N) g de N por vaso. Essas doses representaram, respectivamente, 0, 80, 160 e 240 kg de $N \cdot ha^{-1}$. O experimento foi conduzido em esquema fatorial (12 cultivares \times 3 doses de N + controle), em delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Cada unidade experimental foi composta por dois vasos de 20 L (35 \times 30 cm), onde foram avaliadas 30 plantas homogêneas por unidade experimental. As características químicas e físicas do solo podem ser

→

observadas na Tabela 1. O pH do solo foi corrigido com calcário dolomítico (PRNT de 85%), buscando-se um valor de saturação por bases próximo a 70%. Da mesma forma, o solo foi corrigido com potássio e fósforo, na dose de 60 kg·ha⁻¹.

A aplicação de N foi dividida em três etapas: I – 1,4 g de N por vaso na base para todos os tratamentos, exceto no tratamento controle; II – 65% do restante de N no início do perfilhamento (Z 22; Zadoks et al. 1974); e III – 35% no final do perfilhamento (Z 39; Zadoks et al. 1974). Como fonte de N, foi utilizada ureia (45% de N) diluída em água. O controle de pragas e doenças foi realizado conforme recomendações para a cultura do trigo.

As determinações dos teores de clorofila a*, b* e a + b* foram realizadas no estádio Z 6.5 (Zadoks et al. 1974) de cada cultivar, utilizando-se clorofilômetro portátil modelo ClorofiLOG CFL 1030-Falker. As leituras foram realizadas na posição central da folha-bandeira de 20 plantas por unidade experimental.

No momento da antese (Z 60), procedeu-se à coleta de forma aleatória de três plantas por unidade experimental para determinar o N acumulado na palha. Na maturidade fisiológica (Z 90), as demais plantas foram colhidas. As frações de grãos e fitomassa (planta sem raiz) foram separadas manualmente. A massa de grãos foi mensurada e sua umidade, padronizada a 13% para determinação do RG. As frações de fitomassa foram secas em estufa a 40 °C por 48 h e trituradas em moinho de facas. Posteriormente, as amostras de fitomassa e grãos foram submetidas a análise química para determinação da concentração de N conforme o método de Kjeldahl (Tedesco et al. 1995).

O N total nos grãos, na biomassa em antese e na maturidade fisiológica foi mensurado multiplicando-se a concentração de N (%) da fração pela produção de biomassa. As medidas da EUN foram calculadas segundo Moll et al. (1982), Guarda et al. (2004) e Foulkes et al. (2009): $EUN (g \cdot g^{-1}) = RG/SN$, onde RG é o rendimento de grãos (g) e SN representa o N fornecido pelo fertilizante (g); $EAN (g \cdot g^{-1}) = (NG + NMF)/SN$, onde NG é a quantidade de N nos grãos (g) e NMF representa a quantidade de N na fitomassa na maturidade fisiológica (g); $EUtN (g \cdot g^{-1}) = RG/(NG + NMF)$ e $ERN (\%) = NMF - (NMF - NG)/N_{antese}$, onde N_{antese} representa o N total na antese (g).

Os dados foram testados quanto à distribuição normal (teste de Kolmogorov-Smirnov, $p \leq 0,05$; Sprent e Smeeton 2007). Na sequência, procedeu-se à análise de variância, considerando-se os efeitos de cultivares, as doses de N e a interação como fixos. Como medida de precisão experimental, foi estimada a acurácia seletiva ($AS = \sqrt{1 - 1/Fc}$), conforme Resende e Duarte (2007), para os efeitos principais de N e de cultivares. O efeito das doses de N foi mensurado mediante análise de regressão polinomial, testada até o grau cúbico. Sem a ocorrência de efeito significativo da interação, a análise de regressão foi executada para a média das cultivares. As médias de cultivares foram comparadas pelo teste aglomerativo de Scott-Knott ($p = 0,05$), no geral e dentro de cada dose de N (baixa oferta e alta oferta de N). Adicionalmente, após a verificação da multicolinearidade entre as variáveis explicativas (Montgomery e Peck 1981), foi realizada a análise de trilha (Wright 1921) para identificação dos efeitos diretos e indiretos das medidas sobre o RG e a EUN. Essas análises foram realizadas com o uso do programa Genes (Cruz 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os caracteres avaliados apresentaram significância ($p < 0,01$) para o efeito de cultivar e doses de N (Tabela 2). As medidas da EAN, EUN, ERN, N_{antese} , NMF e $N_{grãos}$ também foram afetadas pela interação cultivar *versus* dose de N, resultado que indica diferenças nas respostas das cultivares em relação às doses de N. A precisão experimental, relacionada aos efeitos de N e de cultivar, avaliadas pela magnitude da AS, é muito alta ($AS > 0,90$), segundo o critério de Resende e Duarte (2007), para todos os caracteres avaliados. Essa precisão favorece a discriminação entre as cultivares.

Para fins de comparação das médias de cultivares dentro de doses de N (Tabela 3), essas doses foram agrupadas em duas classes: baixa oferta de N (média das doses de 0 e 80 kg N·ha⁻¹) e alta oferta de N (média das doses de 160 e 240 kg N·ha⁻¹). Ainda nessa tabela, para os caracteres sem interação, a comparação entre as médias das cultivares foi realizada pela média das quatro doses de N.

Tabela 1. Resultados da análise química do solo utilizado no experimento.

p (CaCl ₂)	H + Al	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	P	MO	V	M
	(cmolc·dm ⁻³)					(mg·dm ⁻³)	(g·dm ⁻³)	(%)	
4,90	5,31	0,77	5,12	2,89	0,61	796	65,65	58,75	8,66

pH = Potencial hidrogeniônico; H + Al = Acidez potencial do solo; Al⁺³ = Alumínio; Ca⁺² = Cálcio; Mg⁺² = Magnésio; K⁺ = Potássio; P = Fósforo; MO = Matéria orgânica; V = Saturação por bases; M = Saturação por Alumínio.

Tabela 2. Análise de variância incluindo os valores do quadrado médio dos efeitos de doses de Nitrogênio, cultivares, interação e erro experimental, com respectivos graus de liberdade, média e acurácia seletiva para 11 medidas avaliadas em plantas de 12 cultivares de trigo modernas, sob efeito de doses de N.

Caracteres	Fontes de variação				Média	Acurácia seletiva	
	Doses de N (GL = 3)	Cultivares (GL = 11)	Interação (GL = 33)	Erro (GL = 94)		N	Cultivar
RG	1.588,73*	603,62*	21,52	19,567	64,99	0,99	0,98
Chl _a	44,41*	17,85*	0,76	1,023	35,33	0,98	0,97
Chl _b	62,77*	22,08*	0,34	0,727	14,46	0,99	0,98
Chl _{a+b}	212,45*	79,08*	1,62	3,089	49,79	0,99	0,98
EUN	2.924,37*	395,02*	21,68	23,946	48,34	0,99	0,96
EAN	0,45*	0,10*	0,02*	0,006	1,82	0,99	0,97
EUtN	1.494,05*	132,*	47,79*	5,994	28,32	0,99	0,97
ERN	1.223,19*	107,2*	17,06*	6,510	26,89	0,99	0,96
N _{antese}	15,35*	0,17*	0,13*	0,033	2,06	0,99	0,90
NMF	0,77*	0,04*	0,04*	0,002	0,51	0,99	0,97
N _{grãos}	10,31*	0,42*	0,18*	0,024	1,93	0,99	0,97

*Significativo pelo teste F ($p \leq 0,01$). GL = Graus de liberdade; RG = Rendimento de grãos (g de grãos por parcela); Chl_a = Clorofila a (Índice Falker); Chl_b = Clorofila b (Índice Falker); Chl_{a+b} = Clorofila total; EUN = Eficiência de uso do N – g de grãos por g de N fornecido ($g \cdot g^{-1}$); EAN = Eficiência de absorção do N – g de N na palha e grãos por g de N fornecido ($g \cdot g^{-1}$); EUtN = Eficiência de utilização do N – g de grãos por g de N na palha e grãos ($g \cdot g^{-1}$); ERN = Eficiência de remobilização do N (%); N_{antese} = N total na antese (%); NMF = N total na maturidade fisiológica (%); N_{grãos} = N total remobilizado para os grãos (%).

Os valores de EAN, EUtN, ERN, N_{antese}, NMF e N_{grãos} diferiram entre as cultivares na baixa e na alta oferta de N (Tabela 3), indicando a presença de mecanismos diversos responsáveis pelo incremento da EUN. Observaram-se cinco cultivares (Topázio, BRS Parrudo, TBIO Iguaçu, TBIO Mestre e TBIO Itaipu) no grupo de maior EAN em condições de baixa oferta de N. No entanto, em condições de alta oferta de N, apenas uma dessas cinco cultivares (BRS Parrudo) permaneceu no grupo de maior EAN, mostrando-se eficiente na absorção de N em ambos os níveis de oferta do nutriente. A EAN apresentou baixa amplitude de variação entre as cultivares (1,54 a 1,89 $g \cdot g^{-1}$ em baixa oferta de N; 1,76 a 2,09 $g \cdot g^{-1}$ em alta oferta de N), corroborando Haile et al. (2012). A EAN depende da capacidade da cultivar em recuperar o N aplicado. Isso possivelmente ocorreu devido às cultivares utilizadas serem genótipos-elite e, conseqüentemente, eficientes na absorção de N.

Quanto ao N total na maturidade fisiológica (NMF), apenas a cultivar Fcep Raízes se manteve no grupo das melhores cultivares nos dois níveis de oferta de N. As cultivares BRS Gaivota e CD 150 em condições de alta oferta de N estão entre as melhores e, nas condições de baixa oferta, estão entre aquelas com níveis intermediários de NMF. Diferenças de comportamento das cultivares, em baixa e alta oferta de N, também podem ser constatadas quanto aos caracteres EUtN, N_{antese} e N_{grãos}. No geral, a cultivar BRS

Parrudo apresentou os maiores valores de EAN, EUtN e N_{antese} em alta oferta de N e maior EAN em baixa oferta de N.

A EUN foi superior na cultivar Mirante (58,55 $g \cdot g^{-1}$), seguida por TBIO Itaipu (55,25 $g \cdot g^{-1}$), BRS Parrudo (52,73 $g \cdot g^{-1}$) e TBIO Iguaçu (52,24 $g \cdot g^{-1}$), e inferior para a cultivar BRS Gaivota (37,59 $g \cdot g^{-1}$) (Tabela 3). A amplitude de variação dos índices de clorofila a* (Chl_a: 33,6 a 37,5), b* (Chl_b: 12,5 a 16,9) e total a + b* (Chl_{a+b}: 46,1 a 54,4) indica presença de variabilidade genética acentuada para esses caracteres. Os maiores índices de clorofila foram observados na cultivar BRS Parrudo (Chl_a: 37,5; Chl_b: 16,9; Chl_{a+b}: 54,4). A cultivar Mirante apresentou elevados índices de clorofila (Chl_a: 36,6; Chl_b: 15,9; Chl_{a+b}: 52,6), o maior RG (74,3 g) e a maior EUN (58,5 $g \cdot g^{-1}$).

A EUtN variou entre 25,64 e 38,91 $g \cdot g^{-1}$ em baixa oferta de N e entre 18,86 e 28,70 $g \cdot g^{-1}$ em alta oferta de N. Os maiores valores foram observados para as cultivares Mirante e TBIO Iguaçu (baixa oferta de N) e para as cultivares Mirante, TBIO Iguaçu, BRS Parrudo e TBIO Itaipu (alta oferta de N); essas cultivares também apresentaram elevada EUN (Tabela 3).

A variação dos valores observados em função das quatro doses de N, por cultivar (caracteres com interação) e no geral, é apresentada na Tabela 4. Verifica-se que os dados se ajustaram aos modelos de regressão polinomial, pois os coeficientes de determinação (R^2) são altos para os modelos dentro de cada cultivar e menores no geral.

→

Tabela 3. Médias de caracteres em plantas de 12 cultivares modernas de trigo submetidas a baixa (0 e 80 kg de N·ha⁻¹) e alta (160 e 240 kg de N·ha⁻¹) oferta de N.

Baixa oferta de N		Alta oferta de N		Baixa oferta de N		Alta oferta de N		Caracteres sem interação		
Cult	EAN	Cult	EAN	Cult	EUtN	Cult	EUtN	Cult	Chl _a	Chl _b
1	1,73 b*	1	1,76 c	1	33,12 c	1	20,78 b	1	35,01 c	14,37 c
2	1,81 a	2	1,94 b	2	30,27 d	2	22,15 b	2	36,70 b	15,73 b
3	1,83 a	3	2,09 a	3	32,63 c	3	28,70 a	3	37,47 a	16,94 a
4	1,78 b	4	1,99 b	4	38,84 a	4	27,52 a	4	36,62 b	15,95 b
5	1,54 d	5	1,80 c	5	36,01 b	5	23,05 b	5	35,11 c	14,36 c
6	1,59 d	6	1,84 c	6	27,59 e	6	18,86 b	6	34,85 c	13,44 d
7	1,89 a	7	1,96 b	7	28,04 e	7	28,03 a	7	34,19 d	13,05 d
8	1,72 b	8	1,81 c	8	25,64 e	8	21,23 b	8	36,37 b	15,70 b
9	1,81 a	9	1,98 b	9	38,91 a	9	25,71 a	9	34,75 c	13,78 c
10	1,69 c	10	1,82 c	10	30,09 d	10	20,43 b	10	35,49 c	14,48 c
11	1,80 a	11	1,99 b	11	34,55 c	11	27,11 a	11	33,58 d	12,53 d
12	1,66 c	12	1,87 c	12	32,71 c	12	27,63 a	12	33,89 d	13,23 d
ERN		ERN		N _{antese}		N _{antese}		Chla + b		RG
1	32,69 b	1	23,79 b	1	1,61 b	1	2,57 c	1	49,37 c	66,42 c
2	27,26 c	2	21,34 c	2	1,49 b	2	2,31 c	2	52,42 b	57,79 e
3	32,43 b	3	22,41 c	3	1,63 b	3	2,92 a	3	54,41 a	71,59 b
4	37,30 a	4	26,41 a	4	1,45 b	4	2,58 c	4	52,56 b	74,32 a
5	33,07 b	5	21,72 c	5	1,49 b	5	2,50 c	5	49,47 c	62,36 d
6	26,64 c	6	16,11 d	6	1,45 b	6	2,70 b	6	48,29 c	50,95 f
7	26,31 c	7	20,63 c	7	1,88 a	7	2,67 b	7	47,23 d	61,97 d
8	29,16 c	8	20,67 c	8	1,50 b	8	2,49 c	8	52,08 b	60,18 d
9	32,75 b	9	23,65 b	9	1,60 b	9	2,68 b	9	48,52 c	70,62 b
10	32,80 b	10	21,68 c	10	1,49 b	10	2,44 c	10	49,96 c	63,45 d
11	35,73 a	11	26,21 a	11	1,58 b	11	2,50 c	11	46,13 d	74,91 a
12	31,84 b	12	22,86 b	12	1,47 b	12	2,41 c	12	47,11 d	65,34 c
NMF		NMF		N _{grãos}		N _{grãos}		Cultivares		EUN
1	0,33 d	1	0,52 d	1	1,73 a	1	2,82 a	1	BRS Tangará	49,39 c
2	0,50 a	2	0,59 c	2	1,37 c	2	2,21 d	2	TBIO Mestre	42,83 d
3	0,44 b	3	0,67 b	3	1,57 b	3	2,15 d	3	BRS Parrudo	52,73 b
4	0,41 c	4	0,47 d	4	1,55 b	4	2,45 c	4	Mirante	58,55 a
5	0,29 d	5	0,64 b	5	1,51 b	5	2,31 c	5	BRS Galha Azul	45,86 d
6	0,36 c	6	0,74 a	6	1,35 c	6	2,17 d	6	BRS Gaivota	37,59 e
7	0,39 c	7	0,52 d	7	1,82 a	7	1,81 e	7	Topázio	45,96 d
8	0,37 c	8	0,72 a	8	1,79 a	8	2,40 c	8	CD 150	44,42 d
9	0,39 c	9	0,65 b	9	1,35 c	9	2,35 c	9	TBIO Iguazu	52,24 b
10	0,36 c	10	0,66 b	10	1,65 a	10	2,62 b	10	Fcep Cristalino	47,17 c
11	0,36 c	11	0,61 b	11	1,78 a	11	2,36 c	11	TBIO Itaipu	55,25 b
12	0,55 a	12	0,72 a	12	1,38 c	12	1,85 e	12	Fcep Raízes	48,06 c

*Médias não ligadas por mesma letra diferem pelo teste Scott-Knott ($p = 0,05$). Cult = Cultivares; EAN = Eficiência de absorção do N – g de N na palha e grãos por g de N fornecido ($g \cdot g^{-1}$); EUtN = Eficiência de utilização do N – g de grãos por g de N na palha e grãos ($g \cdot g^{-1}$); Chl_a = Clorofila a (Índice Falker); Chl_b = Clorofila b (Índice Falker); ERN = Eficiência de remobilização do N (%); N_{antese} = N total na antese (%); Chl_{a+b} = Clorofila total; RG = Rendimento de grãos (g de grãos por parcela); NMF = Nitrogênio total na maturidade fisiológica (%); N_{grãos} = N total remobilizado para os grãos (%); EUN = Eficiência de uso do N – g de grãos por g de N fornecido ($g \cdot g^{-1}$).

Tabela 4. Análise de regressão polinomial para 11 caracteres em plantas de 12 cultivares modernas de trigo submetidas a quatro doses de Nitrogênio (x, entre 0 e 240 kg de N·ha⁻¹), por cultivar e no geral.

Cultivar	EAN = a + bx + cx ²	R ²	PC	EUtN = a + bx + cx ²	R ²	PC
1 BRS Tangará	1,76 – 0,0018x + 0,0000095x ²	0,49	95	40,35 – 0,221x + 0,000583x ²	0,91	189
2 TBIO Mestre	1,77 + 0,00083x	0,46	-	36,03 – 0,161x + 0,00042x ²	0,89	192
3 BRS Parrudo	1,67 + 0,0044x – 0,00001x ²	0,84	222	32,32 + 0,0537x – 0,00036x ²	0,77	75
4 Mirante	1,73 + 0,00127x	0,78	-	47,41 – 0,218x + 0,00053x ²	0,83	205
5 BRS Gralha Azul	1,40 + 0,0039 – 0,000009x ²	0,89	216	46,44 – 0,3059x + 0,00088x ²	0,89	174
6 BRS Gaivota	1,46 + 0,00408x – 0,00001x ²	0,96	204	28,81 – 0,0465x	0,82	-
7 Topázio	1,87 + 0,00042x	0,45	-	32,33 – 0,1082x + 0,00038x ²	0,48	142
8 CD 150	1,72	-	-	28,63 – 0,0919x + 0,00026x ²	0,84	176
9 TBIO Iguaçú	1,89	-	-	45,54 – 0,1971x + 0,00046x ²	0,96	214
10 Fcep Cristalino	1,66 + 0,00079x	0,71	-	31,23 – 0,0497x	0,77	-
11 TBIO Itaipu	1,74 + 0,0013x	0,90	-	40,19 – 0,158x + 0,00043x ²	0,77	184
12 Fcep Raízes	1,57 + 0,00156x	0,63	-	37,01 – 0,128x + 0,00038x ²	0,59	168
ERN = a + bx + cx ²			N _{antese} = a + bx + cx ²			
1 BRS Tangará	33,02 + 0,031x – 0,00038x ²	0,89	41	1,51 – 0,0037x + 0,000046x ²	0,91	40
2 TBIO Mestre	28,47 – 0,0348x	0,71	-	1,38 + 0,0043x	0,83	-
3 BRS Parrudo	35,59 – 0,06819x	0,86	-	1,27 + 0,0083x	0,96	-
4 Mirante	37,36 + 0,0063x – 0,00028x ²	0,85	12	1,27 + 0,0062x	0,85	-
5 BRS Gralha Azul	38,20 – 0,164x + 0,00039x ²	0,88	210	1,27 + 0,00604x	0,91	-
6 BRS Gaivota	30,34 – 0,112x + 0,0002x ²	0,94	280	1,12 + 0,0079x	0,98	-
7 Topázio	28,85 – 0,067x + 0,000119x ²	0,91	281	1,72 + 0,0017x + 0,000015x ²	0,94	56
8 CD 150	30,77 – 0,0488x	0,82	-	1,30 + 0,00576x	0,95	-
9 TBIO Iguaçú	34,65 – 0,0538x	0,73	-	1,36 + 0,00647x	0,78	-
10 Fcep Cristalino	34,62 – 0,06149x	0,85	-	1,26 + 0,0058x	0,93	-
11 TBIO Itaipu	36,06 + 0,0018x – 0,00024x ²	0,93	4	1,33 + 0,00592x	0,98	-
12 Fcep Raízes	34,79 – 0,0621x	0,60	-	1,19 + 0,00622x	0,76	-
NMF = a + bx + cx ²			N _{grãos} = a + bx + cx ²			
1 BRS Tangará	0,317 + 0,00091x	0,68	-	1,13 + 0,0176x – 0,000044x ²	0,97	200
2 TBIO Mestre	0,36 + 0,0037x – 0,000012x ²	0,78	154	1,07 + 0,0084x – 0,000013x ²	0,98	323
3 BRS Parrudo	0,39 – 0,00068x + 0,000011x ²	0,81	31	1,38 + 0,00403x	0,74	-
4 Mirante	0,42 – 0,0024x + 0,000014x ²	0,60	85	1,013 + 0,0144x – 0,00003x ²	0,94	240
5 BRS Gralha Azul	0,18 + 0,0035x – 0,000006x ²	0,93	291	0,994 + 0,0138x – 0,00003x ²	0,86	230
6 BRS Gaivota	0,31 + 0,0019x	0,81	-	1,19 + 0,0047x	0,88	-
7 Topázio	0,27 + 0,0035x – 0,000011x ²	0,77	159	1,81	-	-
8 CD 150	0,35 + 0,00164x	0,64	-	1,62 + 0,00389x	0,67	-
9 TBIO Iguaçú	0,41 – 0,0017x + 0,000014x ²	0,90	61	0,92 + 0,0144x – 0,000035x ²	0,92	205
10 Fcep Cristalino	0,35 + 0,00128x	0,47	-	1,45 + 0,00568x	0,95	-
11 TBIO Itaipu	0,30 + 0,00153x	0,87	-	1,23 + 0,0157x – 0,000046x ²	0,88	170
12 Fcep Raízes	0,46 + 0,001379x	0,64	-	1,01 + 0,0113x – 0,000034x ²	0,85	166
Caracteres sem interação N × cultivar						
	Chl _a = 34,11 + 0,01018x	0,34	-	Chlb = 12,98 + 0,0123x	0,40	-
	Chl _{a+b} = 47,09 + 0,0225x	0,37	-	RG = 57,59 + 0,0617x	0,36	-
	EUN = 58,36 – 0,08x	0,89	-			

EAN = Eficiência de absorção do N – g de N na palha e grãos por g de N fornecido (g·g⁻¹); PC = Ponto crítico (máximo ou mínimo); EUtN = Eficiência de utilização do N – g de grãos por g de N na palha e grãos (g·g⁻¹); ERN = Eficiência de remobilização do N (%); N_{antese} = N total na antese (%); NMF = N total na maturidade fisiológica (%); N_{grãos} = N total remobilizado para os grãos (%); Chl_a = Clorofila a (Índice Falker); Chl_b = Clorofila b (Índice Falker); Chl_{a+b} = Clorofila total; RG = Rendimento de grãos (g de grãos por parcela); EUN = Eficiência de uso do N – g de grãos por g de N fornecido (g·g⁻¹).

A EAN apresentou comportamento linear crescente para seis cultivares e quadrático, com ponto de máximo dentro dos limites estudados, para quatro cultivares. O ponto crítico (PC, de máximo) da EAN foi obtido com 222 kg de N·ha⁻¹ para BRS Parrudo, 216 kg de N·ha⁻¹ para BRS Gralha Azul e 204 kg de N·ha⁻¹ para BRS Gaivota. Na cultivar BRS Tangará, observou-se decréscimo na EAN com o aumento da oferta de N, enquanto CD 150 e TBIO Iguazu foram indiferentes. Guarda et al. (2004) e Asplund et al. (2014) também observaram aumento da EAN em função do aumento das doses de N aplicadas.

Para a EUtN, as cultivares BRS Gaivota e Fcep Cristalino apresentam comportamento linear decrescente, enquanto as demais evidenciaram resposta quadrática com ponto de mínimo (nas doses indicadas na tabela) para as cultivares BRS Tangará, TBIO Mestre, Mirante, BRS Gralha Azul, Topázio, CD 150, TBIO Iguazu, TBIO Itaipu e Fcep Raízes e ponto de máximo (N = 75 kg de N·ha⁻¹) para a cultivar BRS Parrudo. Na média das cultivares, observa-se uma tendência de redução da EUtN à medida que se eleva a oferta de N, com estabilização na dose de 231 kg de N·ha⁻¹ (PC de mínimo). O comportamento diferencial das cultivares quanto à relação da EUtN com as doses de N é importante na definição do manejo e na escolha da cultivar.

A ERN apresentou comportamento linear decrescente para seis cultivares, enquanto as demais evidenciaram respostas quadráticas. Foram obtidos PCs de máximo da dose de N mais baixos para as cultivares BRS Tangará (41 kg de N·ha⁻¹), Mirante (12 kg de N·ha⁻¹) e TBIO Itaipu (4 kg de N·ha⁻¹) e valores de PC

de mínimo próximos à dose máxima usada para as cultivares BRS Gralha Azul, BRS Gaivota e Topázio. Isso ocorreu porque as maiores doses de N resultaram em uma elevação do N_{antese} e as cultivares não foram capazes de remobilizar, na mesma taxa, o N proveniente de altas doses em comparação com as menores ofertas. Barbottin et al. (2005) e Kichey et al. (2007) também relataram que a ERN é dependente da dose de N utilizada, com as maiores taxas de remobilização observadas nas menores ofertas de N.

O N_{antese} é a principal fonte de N para os grãos (Gaju et al. 2014). As maiores concentrações de proteína nos grãos estão relacionadas a uma maior remobilização de N pós-antese (Barraclough et al. 2014; Bogard et al. 2010). Segundo Kichey et al. (2007), grande parte do N encontrado nos grãos é proveniente da remobilização do N armazenado na parte aérea e raízes da planta antes da antese. À medida que se aumenta a oferta de N, a maioria das cultivares respondem de forma positiva, demonstrando aumento médio do N_{antese} de 0,0063% a cada kg de N aplicado. Resposta positiva ao aumento na dose de N aplicado foi também observada para NMF e N_{grãos}. Para o N_{grãos}, na média das cultivares, existe uma resposta quadrática com PC de 224 kg de N·ha⁻¹ (dados não apresentados).

Os efeitos diretos e indiretos de sete medidas em plantas sobre a EUN (Tabela 5) e sobre o RG (Tabela 6) foram mensurados através da análise de trilha. Observou-se efeito direto (ED) de magnitude e sinal semelhante ao coeficiente de correlação (r) da ERN sobre a EUN nas condições de baixa (ED = 0,94; r = 0,617) e alta (ED = 0,65; r = 0,721) oferta de N, corroborando Barraclough et al. (2014), Guo et al. (2014) e Le Gouis et al. (2000).

→

Tabela 5. Efeitos diretos e indiretos dos caracteres clorofila a, clorofila b, eficiência de absorção do Nitrogênio, eficiência de utilização do Nitrogênio, eficiência de remobilização do Nitrogênio, Nitrogênio total na antese e Nitrogênio total na maturidade fisiológica sobre a eficiência de uso do Nitrogênio nas condições de baixa (0 e 80 kg de N·ha⁻¹) e alta oferta de Nitrogênio (160 e 240 kg de N·ha⁻¹), coeficiente de correlação linear de Pearson (r) e coeficiente de determinação do modelo (R²).

Efeitos	Chl _a	Chl _b	EAN	EUtN	ERN	N _{antese}	NMF
Baixa oferta de Nitrogênio (NC = 45)							
Direto sobre EUN	0,091	-0,117	0,221	0,315	0,942	0,568	0,251
Indireto via Chl _a		0,084	0,021	-0,023	-0,008	0,024	0,022
Indireto via Chl _b	-0,108		-0,034	0,034	0,015	-0,036	-0,035
Indireto via EAN	0,052	0,065		-0,050	-0,079	0,146	0,084
Indireto via EUtN	-0,078	-0,091	-0,071		0,196	-0,151	-0,130
Indireto via ERN	-0,084	-0,122	-0,337	0,587		-0,558	-0,423
Indireto via N _{antese}	0,150	0,178	0,376	-0,273	-0,337		0,207
Indireto via NMF	0,062	0,075	0,096	-0,104	-0,113	0,091	
Soma (r)	0,085	0,072	0,272*	0,487*	0,617*	0,084	-0,023
R ²	0,836						

...continua

Tabela 5. Continuação...

Efeitos	Chl _a	Chl _b	EAN	EUtN	ERN	N _{antese}	NMF
Alta oferta de Nitrogênio (NC = 19)							
Direto sobre EUN	-0,183	0,205	0,027	0,155	0,654	0,006	0,023
Indireto via Chl _a		-0,159	-0,040	0,006	0,002	-0,019	-0,003
Indireto via Chl _b	0,178		0,040	-0,007	-0,003	0,031	0,016
Indireto via EAN	0,006	0,005		0,010	-0,003	0,012	0,000
Indireto via EUtN	-0,005	-0,005	0,057		0,086	-0,011	-0,070
Indireto via ERN	-0,007	-0,008	-0,072	0,362		-0,411	-0,327
Indireto via N _{antese}	0,001	0,001	0,003	0,000	-0,004		0,001
Indireto via NMF	0,000	0,002	0,000	-0,010	-0,011	0,005	
Soma (r)	-0,011	0,041	0,015	0,516*	0,721*	-0,387*	-0,360*
R ²	0,551						

*Correlação (r) significativa pelo teste t ($p < 0,05$); Chl_a = Clorofila a (Índice Falker); Chl_b = Clorofila b (Índice Falker); EAN = Eficiência de absorção do N; EUtN = Eficiência de utilização do N; ERN = Eficiência de remobilização do N (%); N_{antese} = N total na antese (%); NMF = N total na maturidade fisiológica (%); EUN = Eficiência de uso do N; NC = Número de condição (colinearidade).

Tabela 6. Efeitos diretos e indiretos dos caracteres clorofila a, clorofila b, eficiência de absorção do Nitrogênio, eficiência de utilização do Nitrogênio, eficiência de remobilização do Nitrogênio, Nitrogênio total na antese e Nitrogênio total na maturidade fisiológica sobre o rendimento de grãos nas condições de baixa (0 e 80 kg de N·ha⁻¹) e alta oferta de Nitrogênio (160 e 240 kg de N·ha⁻¹), coeficiente de correlação linear de Pearson (r) e coeficiente de determinação do modelo (R²).

Efeitos	Chl ^a	Chl ^b	EAN	EUtN	ERN	N _{antese}	NMF
Baixa oferta de Nitrogênio (NC = 45)							
Direto sobre RG	-0,052	0,084	0,051	-0,038	1,058	0,987	0,309
Indireto via Chl _a		-0,048	-0,012	0,013	0,005	-0,014	-0,013
Indireto via Chl _b	0,078		0,025	-0,024	-0,011	0,026	0,025
Indireto via EAN	0,012	0,015		-0,012	-0,018	0,034	0,020
Indireto via EUtN	0,009	0,011	0,009		-0,024	0,018	0,016
Indireto via ERN	-0,095	-0,137	-0,378	0,659		-0,627	-0,475
Indireto via N _{antese}	0,260	0,308	0,653	-0,474	-0,585		0,360
Indireto via NMF	0,076	0,092	0,118	-0,128	-0,139	0,113	
Soma (r)	0,290*	0,326*	0,465*	-0,004	0,286*	0,538*	0,241*
R ²	0,945						
Alta oferta de Nitrogênio (NC = 19)							
Direto sobre RG	-0,001	-0,028	0,093	0,052	1,321	0,930	0,381
Indireto via Chl _a		-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Indireto via Chl _b	-0,024		-0,006	0,001	0,000	-0,004	-0,002
Indireto via EAN	0,020	0,018		0,034	-0,010	0,043	0,000
Indireto via EUtN	-0,002	-0,002	0,019		0,029	-0,004	-0,024
Indireto via ERN	-0,014	-0,017	-0,145	0,731		-0,831	-0,661
Indireto via N _{antese}	0,096	0,141	0,433	-0,065	-0,585		0,189
Indireto via NMF	0,007	0,030	-0,001	-0,172	-0,191	0,077	
Soma (r)	0,082	0,141	0,392*	0,581*	0,564*	0,211	-0,117
R ²	0,977						

*Correlação (r) significativa pelo teste t ($p < 0,05$). EUN = Eficiência de Uso do Nitrogênio; Chl_a = Clorofila a (Índice Falker); Chl_b = Clorofila b (Índice Falker); EAN = Eficiência de absorção do N; EUtN = Eficiência de utilização do N; ERN = Eficiência de remobilização do N (%); N_{antese} = N total na antese (%); NMF = Nitrogênio total na maturidade fisiológica (%); RG = Rendimento de grãos; NC = Número de condição (colinearidade).

Embora a EUN tenha sido associada com a EUN ($r = 0,487$ e $r = 0,516$), isso se deveu principalmente aos efeitos indiretos (EI) da ERN (EI = 0,587) em baixa oferta de N. Isso indica que, para um grupo de cultivares modernos, a utilização do N disponível está atrelada à capacidade das cultivares em remobilizar o nutriente para os grãos. Além disso, sob baixa oferta de N, constatou-se ED do N_{antese} sobre a EUN (ED = 0,568) devido ao EI de ERN com sinal oposto anulando a correlação. Esse ED não foi observado em alta oferta (ED = 0,006). Isso se explica devido ao aumento linear do N_{antese} na maioria das cultivares, conforme o aumento das doses de N (Tabela 4); dessa forma, com alta oferta de N resultando em elevada quantidade de N_{antese} , a ERN apresenta-se como medida de maior associação com a EUN (ED = 0,654) (Tabela 5).

A associação entre N_{antese} e RG deve-se ao seu ED sobre o RG, sob baixa (ED = 0,987) e alta (ED = 0,930) oferta de N (Tabela 6). Nesse sentido, sob baixa oferta de N, é possível selecionar cultivares com maior EUN a partir da seleção indireta sobre ERN ou N_{antese} . Sob alta oferta, provavelmente há uma saturação de N e o que passa a explicar a EUN é a capacidade das cultivares em remobilizar o N da palhada para os grãos, o que resulta em um maior peso de grãos e, conseqüentemente, maior RG. Na condição de baixa oferta de N, Beche et al. (2014) observaram elevado ED da ERN sobre a produtividade de grãos e, na condição de alta oferta, constataram efeito superior da EUN e da

EAN. Essa divergência nos resultados possivelmente deve-se ao conjunto de cultivares empregado naquele estudo, caracterizado por cultivares pioneiras e modernas, ao passo que, nesta pesquisa, foram utilizadas apenas cultivares modernas.

As medidas de Chl_a , Chl_b e Chl_{a+b} são dependentes da cultivar (Tabela 3) e da dose de N aplicado (Tabela 4). No entanto, não se observam (Tabelas 5 e 6) ED e EI importantes sobre a EUN e o RG. Na condição de baixa oferta de N, a correlação do RG com Chl_a e Chl_b é significativa, devido ao EI do N_{antese} . Dessa forma, neste estudo, a avaliação de Chl_a , Chl_b e Chl_{a+b} nas plantas foi importante para a estimativa da EUN.

CONCLUSÃO

A eficiência de uso do Nitrogênio pelas cultivares avaliadas decorre principalmente da eficiência destas em remobilizar o Nitrogênio absorvido para a produção de grãos. É possível selecionar cultivares de trigo com maior eficiência de uso do Nitrogênio a partir da seleção indireta sobre a eficiência de remobilização do Nitrogênio ou do Nitrogênio total na antese. As cultivares de trigo Mirante, TBIO Itaipu, BRS Parrudo e TBIO Iguaçu são as mais eficientes no uso do Nitrogênio, sendo as duas primeiras mais eficientes na remobilização do elemento.

REFERÊNCIAS

- Asplund, L., Bergkvist, G. e Weih, M. (2014). Proof of concept: nitrogen use efficiency of contrasting spring wheat varieties grown in greenhouse and field. *Plant Soil*, 374, 829-842. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1895-6>.
- Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C. e Jeuffroy, M. H. (2005). Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: genotypic and environmental effects. *Crop Science Society of America*, 45, 1141-1150. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2003.0361>.
- Barraclough, P. B., Howarth, J. R., Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C. E. e Hawkesford, M. J. (2010). Nitrogen efficiency of wheat: genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *European Journal of Agronomy*, 33, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.005>.
- Barraclough, P. B., Lopez-Bellido, R. e Hawkesford, M. J. (2014). Genotypic variation in the uptake, partitioning and remobilization of nitrogen during grain-filling in wheat. *Field Crops Research*, 156, 242-248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.004>.
- Beche, E., Benin, G., Bornhofen, E., Dalló, S. C., Sassi, L. H. e Oliveira, R. (2014). Eficiência de uso de Nitrogênio em cultivares de trigo pioneiras e modernas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49, 948-957. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-04X2014001200005>.
- Bogard, M., Allard, V., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Mchet, J. M., Jeuffroy, M. H., Gate, P., Martre, P. e Le Gouis, J. (2010). Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to postanthesis N uptake in winter wheat. *Journal of Experimental Botany*, 61, 4303-4312. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq238>.

- Caierão, E., Scheeren, P. L., Silva, M. S. e Castro, R. L. (2014). History of wheat cultivars released by Embrapa in forty years of research. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14, 216-223. <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332014v14n4a34>.
- Cormier, F., Faure, S., Dubreuil, P., Heumez, E., Beauchêne, K., Lafarge, S., Praud, A. e Le Gouis, J. (2013). A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 126, 3035-3048. <http://dx.doi.org/10.1007/s00122-013-2191-9>.
- Cruz, C. D. (2013). GENES — a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35, 271-276. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>.
- Cui, Z., Wang, G., Yue, S., Wu, L., Zhang, F. e Chen, X. (2014). Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security. *Environmental Science and Technology*, 48, 5780-5787. <http://dx.doi.org/10.1021/es5007127>.
- Dai, X., Zhou, X., Jia, D., Xiao, L., Kong, H. e He, M. (2013). Managing the seeding rate to improve nitrogen-use efficiency of winter wheat. *Field Crops Research*, 154, 100-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.07.024>.
- Duan, Y., Shi, X., Li, S., Sun, X. e He, X. (2014). Nitrogen use efficiency as affected by phosphorus and potassium in long-term rice and wheat experiments. *Journal of Integrative Agriculture*, 13, 588-596. [http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60716-9](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60716-9).
- Foulkes, M. J., Hawkesford, M. J., Barraclough, P. B., Holdsworth, M. J., Kerr, S., Kightley, S. e Shewry, P. R. (2009). Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: recent advances and future prospects. *Field Crops Research*, 114, 329-342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.005>.
- Gaju, O., Allard, V., Martre, P., Le Gouis, J., Moreau, D., Bogard, M., Hubbart, S. e Foulkes, M. J. (2014). Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars. *Field Crops Research*, 155, 213-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.003>.
- Giambalvo, D., Ruisi, P., Miceli, G. D., Frenda, A. S. e Amato, G. (2010). Nitrogen use efficiency and nitrogen fertilizer recovery of durum wheat genotypes as affected by interspecific competition. *Agronomy Journal*, 102, 707-715. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2009.0380>.
- Guarda, G., Padovan, S. e Delogu, G. (2004). Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy*, 21, 181-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2003.08.001>.
- Guo, Z., Zhang, Y., Zhao, J., Shi, Y. e Yu, Z. (2014). Nitrogen use by winter wheat and changes in soil nitrate nitrogen levels with supplemental irrigation based on measurement of moisture content in various soil layers. *Field Crops Research*, 164, 117-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.016>.
- Haile, D., Nigussie, D. e Ayana, A. (2012). Nitrogen use efficiency of bread wheat: effects of nitrogen rate and time of application. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12, 389-409. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000002>.
- Hawkesford, M. J. (2012). The diversity of nitrogen use efficiency for wheat varieties and the potential for crop improvement. *Better Crops*, 96, 10-12.
- Kaneko, F. H., Arf, O., Gitti, D. D. C., Arf, M. V., Chioderoli, C. A. e Kappes, C. (2010). Manejo do solo e do Nitrogênio em milho cultivado em espaçamentos reduzido e tradicional. *Bragantia*, 69, 677-686. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000300020>.
- Kichey, T., Hirel, B., Heumez, E., Dubois, F. e Le Gouis, J. (2007). In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilization to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Research*, 102, 22-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2007.01.002>.
- Le Gouis, J., Beghin, D., Heumez, E. e Pluchard, P. (2000). Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilization efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 12, 163-173. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00045-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00045-9).
- Moll, R. H., Kamprath, E. J. e Jackson, W. A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74, 562-564. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x>.
- Montgomery, D. C. e Peck, E. A. (1981). Introduction to linear regression analysis. New York: John Wiley.
- Pan, J., Zhu, Y., Jiang, D., Dai, T., Li, Y. e Cao, W. (2006). Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 97, 322-336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2005.11.006>.
- Pask, A. J. D., Sylvester-Bradley, R., Jamieson, P. D. e Foulkes, M. J. (2012). Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth. *Field Crops Research*, 126, 104-118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.021>.

- Rahman, M. A., Sarker, A. Z., Amin, M. F., Jahan, H. S. e Akhter, M. M. (2011). Yield response and nitrogen use efficiency of wheat under different doses and split application of nitrogen fertilizer. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 36, 231-240. <http://dx.doi.org/10.3329/bjar.v36i2.9249>.
- Resende, M. D. V. e Duarte, J. B. (2007). Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 37, 182-194.
- Sadras, V. O. e Lemaire, G. (2014). Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research*, 164, 54-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.006>.
- Silva, C. L., Benin, G., Bornhofen, E., Beche, E., Todeschini, M. H. e Milioli, A. S. (2014). Nitrogen use efficiency is associated with chlorophyll content in Brazilian spring wheat. *Australian Journal of Crop Science*, 8, 957-964.
- Sprent, P. e Smeeton, N. C. (2007). *Applied nonparametric statistical methods*. 4. ed. Boca Raton: Chapman & Hall.
- Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H. e Volkweiss, S. J. (1995). *Análise de solo, plantas e outros materiais*, 2. ed. Porto Alegre: UFRGS.
- Wani, B. A., Ram, M., Yasin, A. e Singh, E. (2011). Physiological traits in integration with yield and yield components in wheat (*Triticum aestivum* L.) Study of their genetic variability and correlation. *Asian Journal of Agricultural Research*, 5, 194-200. <http://dx.doi.org/10.3923/ajar.2011.194.200>.
- Wright, S. (1921). Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20, 557-585.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T. e Konzac, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>.