

ADUBAÇÃO NITROGENADA E POTÁSSICA NA NUTRIÇÃO E NA EXTRAÇÃO DE MACRONUTRIENTES PELO SORGO BIOMASSA

FLÁVIA CRISTINA DOS SANTOS¹, MANOEL RICARDO DE ALBUQUERQUE FILHO¹,
ÁLVARO VILELA DE RESENDE¹, ANTÔNIO CARLOS DE OLIVEIRA¹,
MARCIELE SILVA OLIVEIRA² e TALITA CAMARGOS GOMES³

¹Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, Brasil, flavia.santos@embrapa.br, manoel.ricardo@embrapa.br, alvaro.resende@embrapa.br, antoniocarlos.oliveira@embrapa.br

²Unifem, Sete Lagoas, MG, Brasil, marcieleol@yahoo.com.br

³UFSJ, Sete Lagoas, MG, Brasil, tgcamargos@yahoo.com.br

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.14, n.1, p. 10-22, 2015

RESUMO - O sorgo apresenta grande potencial para produção de bioenergia por apresentar alta produção de biomassa, sendo que aspectos nutricionais são componentes importantes a serem considerados na exploração da cultura para esse fim. Dessa forma, objetivou-se avaliar os efeitos da adubação nitrogenada e potássica na nutrição e na extração de macronutrientes pelo sorgo biomassa. Foram instalados experimentos com as cultivares CMSXS 7020 e CMSXS 652 na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, em delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições. Os tratamentos de cada experimento consistiram de um fatorial 4x4, envolvendo quatro doses de N (0, 80, 160 e 240 kg ha⁻¹) e quatro de K₂O (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) em cobertura. De maneira geral, a adubação com N e K aumentou os teores foliares de N, P, K e S e diminuiu os de Ca e Mg. Quanto à extração de nutrientes, houve aumento da extração de N, K e S e redução de P, Ca e Mg pelo sorgo biomassa, com a aplicação de N e K.

Palavras-chave: etanol lignocelulósico; biocombustível; nitrogênio; potássio; *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

EFFECT OF NITROGEN AND POTASSIUM FERTILISATION ON NUTRITION AND MACRONUTRIENTS EXTRACTION BY BIOMASS SORGHUM

ABSTRACT - Sorghum has a great potential for bioenergy production, because it presents a high biomass production, and nutritional aspects are important components to be considered in the cultivation with this purpose. Thus, the aim of this study was to evaluate the effects of nitrogen and potassium fertilization on nutrition and macronutrient uptake by sorghum biomass. Experiments were conducted with cultivars CMSXS 7020 and CMSXS 652 in the experimental area of Embrapa Maize and Sorghum in a randomized blocks experimental design with three replications. Treatments of each experiment consisted of a 4x4 factorial comprising four N doses (0, 80, 160 and 240 kg ha⁻¹) and four doses of K₂O (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹) topdressed. In general, fertilization with N and K increased foliar rates of N, P, K and S and decreased Ca and Mg. Regarding nutrient uptake, an increased extraction of N, K and S and reduced extraction of P, Ca and Mg were observed in biomass sorghum with the application of N and K.

Key words: lignocellulosic ethanol; biofuel; nitrogen; potassium; *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

A busca por fontes alternativas de combustíveis, especialmente aquelas mais “limpas”, oriundas da produção agrícola, contribui para o desenvolvimento socioeconômico do país. A produção de etanol de segunda geração merece destaque pela ampla variedade de biomassa de plantas e seus derivados, dos quais ele pode ser produzido. O etanol, pela sua natureza, é reconhecido como um combustível “limpo”, biodegradável, que produz menos poluentes do que o petróleo (Sticklen, 2008).

Nesse contexto, o sorgo é promissor para a geração de etanol por apresentar elevado teor de fibras e alta eficiência energética (Barbanti et al., 2006). Associado a isso, pode ser explorado em larga escala por adaptar-se a diversas condições edafoclimáticas, destacando-se como o terceiro maior cereal produzido no mundo (FAO, 2012). O sorgo apresenta ciclo curto de produção (quatro meses), menor exigência em água do que a cana-de-açúcar e o milho e boa tolerância à seca.

Por outro lado, a produção de energia a partir da biomassa de plantas implica em algumas considerações. Hill et al. (2009) concluíram que as vantagens potenciais dos biocombustíveis são dependentes da eficiência dos sistemas de produção nos cultivos e nas biorrefinarias. Na produção tradicional do etanol da cana-de-açúcar, o chamado etanol de primeira geração, o produto é obtido por meio da fermentação da sacarose, em que o caldo corresponde a cerca de 30% da matéria bruta do colmo e cerca de 70% permanecem na forma de bagaço, além de 40% a 50% da palhada, que permanece no campo (Macedo & Nogueira, 2005). O bagaço pode ser convertido em fertilizante, em torta de filtro ou transformado em energia. Ainda assim, há um excesso de resíduo no processo, a vinhaça, que pode retornar ao solo via fertirrigação, promovendo uma ciclagem de nutrientes e menor impacto

sobre o estoque de nutrientes no solo e das fontes de fertilizantes. Quando se trata do etanol de segunda geração ou etanol celulósico, toda ou o máximo possível da biomassa da planta é convertida em etanol por meio do “desmonte” da parede celular e da utilização de seus polissacarídeos como fontes de açúcares fermentáveis, resultando em um processo de exportação de nutrientes do solo muito mais drástico e com baixa taxa de reciclagem, o que sugere uma degradação do solo muito mais intensa se não forem tomados os devidos cuidados na reposição de nutrientes e de matéria orgânica (Albuquerque Filho & Tardin, 2009). Daí a grande importância de se estudar o efeito da adubação na nutrição e na exportação de nutrientes pelas plantas de sorgo biomassa, até mesmo porque a maioria dos trabalhos de pesquisa existentes envolvem o sorgo grânifero e o para silagem. Além disso, embora não tenha sido objeto específico deste trabalho, estudos mostram que o nitrogênio aumenta a eficiência fermentativa, bem como a sobrevivência das células de levedura e, conseqüentemente, gera uma maior produção de etanol (Casey et al., 1984; Kalmokoff & Ingledew, 1985; Silva et al., 2006). Já o potássio, segundo Malavolta (2006), é necessário para a formação dos açúcares e do amido e para seus transportes até os órgãos de reserva. Portanto, adubações com esse nutriente são de fundamental importância, principalmente no que se refere ao aumento dos teores de carboidratos, constituinte fundamental para a produção de etanol.

Diante do exposto, é fundamental o conhecimento sobre nutrição de plantas de sorgo para se aplicar adequadamente o manejo nutricional, especialmente do nitrogênio e do potássio, que são os nutrientes absorvidos em maiores quantidades pelas plantas (Coelho et al., 2002), visando à manutenção de altas produtividades, além de se evitar o empobrecimento e/ou o desbalanço de nutrientes no solo, bem como

garantir a eficiência e a qualidade do processo de produção de etanol de segunda geração.

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da adubação nitrogenada e potássica na nutrição e na extração de macronutrientes pelo sorgo biomassa.

Material e Métodos

Foram conduzidos dois experimentos no campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG (-19° 28' S e 44° 15' W), nas safras 2010-2011 e 2011-2012, sob irrigação, em latossolo vermelho distroférico típico, com as seguintes características químicas e físicas: pH H₂O = 5,1, Al = 0,53; Ca = 2,6; Mg = 0,6; T = 9,8 (cmol_c dm⁻³); P = 2,1; K = 39,0 (mg dm⁻³); V = 30,0%; teores de argila e matéria orgânica = 67,0 e 2,7 (dag kg⁻¹). O solo recebeu 3,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 95%), no dia 22/12/2010, para correção da acidez e elevação da saturação por bases a 60%.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com três repetições. Os tratamentos de cada experimento consistiram de um fatorial 4x4, envolvendo quatro doses de N (0, 80, 160 e 240 kg ha⁻¹) e quatro doses de K₂O (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) em cobertura. As parcelas foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas a 0,7 m. A parcela útil foi composta pelas duas linhas centrais, eliminando-se 0,5 m de bordadura em cada extremidade, resultando em 4 m de comprimento.

Foram utilizadas as variedades de sorgo biomassa CMSXS 7020 e CMSXS 652, tipo forrageiros e sensíveis à foto período, prevendo um estande de 130.000 plantas por hectare (nove plantas por metro linear). Na safra 2010-2011, o plantio foi realizado em 02/02/11. A adubação de plantio foi de 500 kg ha⁻¹ do

formulado 08-28-16+Zn, aplicados no sulco de semeadura, somados a 17,6 kg ha⁻¹ de ácido bórico, aplicada em todos os tratamentos, incluindo a testemunha. A adubação de cobertura com NK foi realizada 35 dias após o plantio, quando as plantas apresentavam de dois a três pares de folhas completamente desenvolvidas. Utilizaram-se as fontes ureia e cloreto de potássio, aplicadas superficialmente e ao lado, à distância de 20 cm, das linhas de plantio. A colheita foi realizada em 10/06/11.

Após a colheita do sorgo, todo o material vegetal restante na área foi retirado, simulando o que ocorreria em área comercial. Essa permaneceu em pousio até o próximo plantio do sorgo da safra 2011-2012, que foi realizado em 11/11/11, utilizando as mesmas parcelas da safra anterior e os mesmos tratamentos (adubações de plantio e cobertura). A colheita do sorgo CMSXS 7020 foi realizada em 03/05/12 e a do CMSXS 652 em 16/05/12, pois nesse último o ponto de maturação ocorreu mais tarde. Nas duas safras, foi realizada a irrigação da cultura quando necessário, utilizando o programa Irrigafácil 2.0 (Albuquerque et al., 2013).

As variáveis avaliadas foram os teores foliares e a extração de macronutrientes por tonelada de matéria seca produzida pelas plantas de sorgo biomassa. Para avaliação dos teores foliares, foram coletadas 20 folhas do terço médio das plantas de sorgo por parcela útil (2 linhas de 4 m) no período de emborrachamento e, para a extração de macronutrientes, todas as plantas da parcela útil foram cortadas rente ao solo na colheita. Todo material foi seco em estufa de circulação forçada (65 °C até peso constante). Após secagem, as plantas inteiras foram pesadas e, assim como as folhas, foram trituradas, sendo posteriormente determinados os teores de macronutrientes, segundo Tedesco et al. (1985). Foi, então, estimada a extração de macronutrientes por tonelada de matéria seca produzida.

Os dados foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) para testar os efeitos de N e K, com posterior ajuste de regressões para os efeitos significativos, utilizando-se o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2011).

Resultados e Discussão

Os valores dos teores foliares dos macronutrientes apresentaram média dentro da faixa adequada para a cultura do sorgo (Martinez et al., 1999), à exceção dos teores foliares médios do P, que apresentaram valores abaixo do nível crítico para a cultura, que é de $4,4 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabelas 1 e 3). Logo, as aplicações anuais de 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 do formulado 08-28-16 + Zn, para o solo com teor muito baixo de P, não foram suficientes para atender à demanda do sorgo. Pode-se supor, pelo elevado teor de argila do solo ($67,0 \text{ dag kg}^{-1}$), que tenha havido alta adsorção de P no solo, prejudicando a absorção pela planta (Novais et al., 2007), sugerindo aplicações ainda maiores de P no sulco de plantio.

De maneira geral, os teores foliares foram alterados mais vezes pelas doses de N em relação às doses de K (Tabelas 1 e 3), com a adubação aumentando os teores de N, K, P e S, e diminuindo os teores de Ca e Mg (Tabelas 5 e 6), o que se explica pela interação entre nutrientes existente no solo, podendo um nutriente prejudicar a absorção de outro, ou mesmo favorecer, o que é conhecido como antagonismo e sinergismo (Raij, 2011).

Particularmente, o N tem grande importância para a produtividade das plantas, pois está diretamente envolvido no processo da fotossíntese. Logo, em condições de baixa disponibilidade de N, vários processos fisiológicos da planta são afetados, assim como a absorção de macronutrientes, como Ca, Mg e S (Carelli et al., 1996; Santi et al., 2006).

Já o K é considerado o primeiro nutriente em ordem de extração pelas plantas, pela sua contribuição na formação e na translocação de carboidratos, uso eficiente de água pela planta, equilíbrio na absorção de N, além de facilitar a absorção de outros nutrientes, como o Ca (Marschner, 1997).

Franco (2011), pesquisando a marcha de absorção e acúmulo de nutrientes em sorgo forrageiro, obteve teores foliares de 28,0; 3,3; 38,2; 8,4; 2,0 e $1,7 \text{ g kg}^{-1}$ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente. O autor verificou que os teores foliares de P e Mg estavam abaixo do nível crítico da cultura e os demais estavam adequados. A avaliação e o monitoramento nutricional das plantas por meio da análise foliar é uma ferramenta importante para o manejo adequado da fertilização das culturas. Entretanto, há que se considerar a necessidade do uso de informações complementares, como análise de solo, histórico de produtividade da área, entre outros, uma vez que os teores de nutrientes no tecido foliar das plantas sofre influência de inúmeros fatores (Malavolta et al., 1997).

Analisando os dados de extração de nutrientes por tonelada de matéria seca produzida, quando houve efeito significativo da adubação N e K, verifica-se que houve aumento na extração de N, K e S por tonelada de matéria seca produzida e redução de P, Ca e Mg (Tabelas 2 e 4).

A adequada nutrição da planta apresentada pela análise foliar no que se refere ao N e ao K, bem como suas maiores extrações com a adubação desses nutrientes, sugerem a possibilidade de uma maior produção de etanol de segunda geração, uma vez que tais nutrientes aumentam a qualidade da biomassa em açúcares, bem como o processo fermentativo (Casey et al., 1984; Kalmokoff & Ingledew, 1985; Malavolta, 2006; Silva et al., 2006).

Embora não seja objeto deste estudo em particular, nas Tabelas 2 e 4, são apresentados os dados de produtividade de matéria seca dos sorgos CMSXS 7020 e 652, respectivamente, para subsidiar a discussão da quantidade de nutriente extraída pela cultura, o que é de extrema importância para programas de manejo da adubação. Considerando

a extração por tonelada de matéria seca produzida dos macronutrientes primários (N, P e K) e a máxima produtividade obtida entre os dois materiais (33,95 Mg ha⁻¹ - CMSXS 652 - Tabela 4), obtém-se uma extração de 242 kg de N, 32 kg de P e 298 kg de K, ou seja, quantidades muito elevadas e que exigiriam grande quantidade de fertilizantes para

TABELA 1. Teores foliares de macronutrientes do sorgo CMSXS 7020, fase de emborrachamento, nas safras 2010/2011 e 2011/2012, em função das doses de NK.

Adubação		Safras											
		2010/2011						2011/2012					
N	K ₂ O	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
---kg ha ⁻¹ ---		-----g kg ⁻¹ -----											
0	0	31,27	2,94	13,06	8,32	3,90	1,97	28,30	3,05	16,55	5,50	3,55	1,62
0	60	31,77	3,21	13,18	8,69	4,19	2,07	28,80	2,95	14,17	4,90	3,17	1,64
0	120	31,30	3,22	14,82	8,38	4,00	2,02	29,40	2,84	14,72	4,69	2,97	1,58
0	180	31,17	3,24	15,73	8,82	3,90	2,07	28,57	2,83	13,82	4,54	2,81	1,58
80	0	32,00	3,08	14,48	8,83	4,00	2,05	29,73	2,88	13,11	4,68	2,99	1,60
80	60	32,13	3,14	15,92	8,45	3,98	2,07	29,57	2,87	14,57	4,18	2,91	1,55
80	120	32,20	3,04	14,12	7,66	3,50	2,03	28,60	2,57	14,10	4,78	2,85	1,52
80	180	31,47	3,18	16,69	8,73	3,40	2,06	29,23	2,92	14,98	4,43	2,94	1,58
160	0	32,20	3,48	15,19	8,87	3,83	2,18	30,47	2,95	15,30	4,55	2,96	1,65
160	60	32,27	3,11	15,24	7,95	3,32	2,18	29,70	3,09	18,17	4,58	3,03	1,78
160	120	31,80	3,16	15,81	7,92	3,58	2,16	30,87	2,98	15,57	4,52	3,02	1,61
160	180	31,90	3,16	15,63	7,71	3,11	2,02	31,30	2,97	15,07	4,44	2,78	1,61
240	0	32,70	2,98	15,17	7,69	3,25	2,07	30,17	2,99	14,56	4,19	2,92	1,63
240	60	32,33	3,22	15,46	8,02	3,33	2,04	30,40	3,03	15,27	4,29	2,83	1,67
240	120	32,73	2,88	14,81	7,35	2,91	2,03	30,10	2,75	14,97	4,34	2,67	1,61
240	180	33,07	3,33	16,88	8,10	3,30	2,21	29,53	2,94	15,73	4,71	3,13	1,69
CV (%)		1,84	5,84	6,45	5,97	12,01	4,21	5,50	10,33	14,28	11,07	7,65	8,30
F.V.	G. L.												
Rep	2												
N	3	***	ns	**	**	***	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
K ₂ O	3	ns	ns	***	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N x K ₂ O	9	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

***, **, * e ns significativo a 0,1; 1 e 5 % de probabilidade e não significativo, respectivamente.

atender à demanda da planta. Entretanto, dessa quantidade, devem ser subtraídas as ofertas existentes no solo e na palhada das culturas antecessoras ao sorgo. Outro ponto a ser considerado é que se espera maior eficiência das plantas mais produtivas, ou seja, redução do coeficiente de utilização biológica

com o aumento da produtividade, como mostrado por Carvalho (2000) e Santos et al. (2008), para as culturas do milho e da soja, respectivamente. Em relação aos nutrientes N e K, sugere-se consumo de luxo, pois os teores de nutrientes nas folhas estavam acima do nível adequado (Tabelas 2 e 4).

TABELA 2. Produtividade de matéria seca do sorgo CMSXS 7020 e extração de macronutrientes por tonelada de matéria seca produzida, nas safras 2010/2011 e 2011/2012, em função das doses de NK.

Adubação		Safras														
		2010/2011							2011/2012							
N	K ₂ O	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	
-- kg ha ⁻¹ --		Mg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----							Mg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					
0	0	11,32	6,27	0,48	10,42	3,84	2,00	0,66	16,21	9,20	1,33	10,42	4,73	3,17	0,79	
0	60	11,05	6,70	0,42	12,00	3,78	2,06	0,66	13,75	8,13	1,17	11,09	3,79	2,79	0,75	
0	120	10,38	6,00	0,41	11,59	3,61	1,77	0,66	17,86	8,97	1,45	11,98	4,28	2,69	0,75	
0	180	12,93	6,83	0,51	11,18	3,62	1,77	0,62	20,35	8,60	1,22	11,62	4,51	2,64	0,71	
80	0	11,07	7,13	0,38	11,54	3,70	1,79	0,62	16,34	9,73	1,36	9,82	5,12	3,25	0,80	
80	60	11,75	6,57	0,40	12,64	3,55	2,07	0,65	21,56	8,83	1,18	12,37	4,33	2,82	0,75	
80	120	12,56	6,50	0,52	13,86	3,59	1,89	0,68	18,46	8,47	1,12	13,56	4,28	2,73	0,77	
80	180	15,45	7,30	0,43	10,92	3,51	1,50	0,60	20,09	7,73	1,25	12,05	4,30	2,50	0,73	
160	0	12,89	6,77	0,48	11,20	3,37	1,71	0,62	20,16	8,67	1,18	10,10	4,56	2,93	0,80	
160	60	13,58	7,63	0,57	10,64	3,49	1,64	0,65	18,82	8,37	1,12	11,23	4,26	2,60	0,73	
160	120	12,89	6,77	0,43	12,30	3,16	1,54	0,61	18,10	8,53	1,25	12,43	4,44	2,81	0,82	
160	180	14,19	6,20	0,50	10,13	3,41	1,49	0,59	19,22	8,17	1,06	10,43	4,22	2,40	0,66	
240	0	11,71	7,10	0,40	9,20	3,38	1,64	0,53	15,07	9,07	1,22	8,14	4,72	3,02	0,76	
240	60	13,50	8,27	0,55	10,56	3,73	1,81	0,67	19,59	9,27	1,22	10,66	4,39	2,80	0,76	
240	120	13,10	6,37	0,42	12,44	3,22	1,48	0,61	22,24	9,27	1,21	10,59	4,36	2,63	0,77	
240	180	10,90	7,07	0,39	11,52	3,30	1,78	0,57	15,92	8,77	1,19	11,66	4,07	2,47	0,71	
CV (%)			14,69	33,94	13,84	13,26	13,24	13,82		8,13	10,95	15,86	9,98	9,69	9,48	
F.V.	G. L.															
Rep	2															
N	3		ns	ns	ns	ns	*	ns		ns	ns	ns	ns	ns	ns	
K ₂ O	3		ns	ns	*	ns	*	ns		*	ns	*	*	***	*	
N x K ₂ O	9		ns	ns	ns	ns	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns	ns	

***, **, * e ns significativo a 0,1; 1 e 5 % de probabilidade e não significativo, respectivamente.

O sorgo é reconhecido como cultura de alta eficiência nutricional (Gardner et al., 1994, Maranville & Madhavan, 2002), o que pode ser explicado, em parte, pela sua origem africana, onde predominam solos pobres em nutrientes. O que não se pode desconsiderar é que, mesmo sendo eficiente na absorção e na utilização de nutrientes,

o sorgo precisa receber doses de fertilizantes para obtenção de altas produtividades (Resende et al., 2009).

Ciancio (2010) obteve produtividade de matéria seca de 9,4 Mg ha⁻¹ de sorgo, ou seja, inferior à deste trabalho, e extrações de N, P, K, Ca e Mg de 14,0; 1,8; 8,6; 6,1 e 3,2 kg Mg⁻¹ de matéria

TABELA 3. Teores foliares de macronutrientes do sorgo CMSXS 652, fase de emborrachamento, nas safras 2010/2011 e 2011/2012, em função das doses de NK.

Adubação		Safras											
		2010/2011						2011/2012					
N	K ₂ O	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
---kg ha ⁻¹ ---		-----g kg ⁻¹ -----											
0	0	33,15	2,80	19,86	7,12	3,37	1,58	26,00	3,41	12,58	5,43	5,16	1,48
0	60	34,87	3,45	19,75	6,79	3,74	1,74	27,73	3,67	14,84	4,56	4,72	1,61
0	120	33,00	3,27	19,78	6,65	4,46	1,67	27,30	3,51	14,13	5,35	5,47	1,57
0	180	34,00	3,14	21,15	6,14	3,14	1,66	23,80	3,23	13,70	4,81	4,45	1,38
80	0	32,80	2,99	20,33	6,83	4,66	1,58	25,97	3,54	13,85	4,97	4,69	1,56
80	60	33,60	3,36	20,20	6,10	4,60	1,57	28,07	3,59	14,83	4,58	4,45	1,62
80	120	34,55	3,35	19,82	5,95	4,38	1,70	24,57	3,17	12,47	4,16	5,02	1,44
80	180	32,40	2,97	21,60	6,43	3,22	1,65	26,03	2,99	14,84	5,48	4,15	1,48
160	0	31,60	2,71	22,35	6,26	3,56	1,68	26,70	3,19	14,37	5,29	4,88	1,60
160	60	31,70	3,02	20,31	6,37	4,75	1,57	26,80	3,37	13,97	5,34	4,96	1,57
160	1x20	33,47	2,94	20,39	6,03	3,95	1,66	29,23	3,60	14,44	4,84	4,84	1,71
160	180	32,87	2,93	22,52	5,57	3,06	1,65	28,87	3,65	15,62	5,16	4,53	1,68
240	0	34,07	2,83	21,15	5,72	2,98	1,65	25,97	3,25	14,50	4,94	4,24	1,53
240	60	35,90	3,08	21,78	5,66	2,92	1,74	28,30	3,47	16,13	4,90	4,16	1,63
240	120	35,83	3,14	21,17	5,07	2,94	1,73	26,73	3,32	15,72	4,92	4,67	1,58
240	180	33,40	2,93	21,75	6,20	3,57	1,64	26,90	3,62	16,25	4,73	4,66	1,61
CV (%)		5,73	11,09	6,48	7,11	26,54	5,67	9,33	12,23	8,88	12,49	15,71	8,29
F.V.	G. L.												
Rep	2												
N	3	*	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
K ₂ O	3	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N x K ₂ O	9	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

***, **, * e ns significativo a 0,1; 1 e 5 % de probabilidade e não significativo, respectivamente.

seca produzida. Esses valores de extração superam as médias dos dois materiais e das duas safras realizadas nesta pesquisa, à exceção do K.

Os dados de Oliveira et al. (2010) com produtividade de 23 Mg ha⁻¹ de matéria seca de sorgo forrageiro e extrações de 9,5; 1,2; 12,6; 1,8 e 2,0

kg Mg⁻¹ de matéria seca para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, se aproximam dos valores encontrados neste trabalho com produtividade média de 17 Mg ha⁻¹ de matéria seca e extrações médias de 7,6; 0,8; 10,8; 3,6; e 2,5 para os mesmos nutrientes (considerando a média dos dois materiais e as

TABELA 4. Produtividade de matéria seca do sorgo CMSXS 652 e extração de macronutrientes por tonelada de matéria seca produzida, nas safras 2010-2011 e 2011-2012, em função das doses de NK.

Adubação		Safras														
		2010/2011							2011/2012							
N	K ₂ O	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	
-- kg ha ⁻¹ --		Mg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----							Mg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					
0	0	10,73	5,25	0,37	9,59	4,01	2,72	0,55	20,03	7,43	1,02	8,16	2,79	2,74	0,56	
0	60	11,23	7,27	0,54	12,18	3,72	2,88	0,60	19,04	8,60	1,23	9,30	2,79	2,59	0,61	
0	120	9,40	6,55	0,43	10,97	3,61	3,29	0,52	19,87	7,37	1,02	8,66	2,87	2,92	0,57	
0	180	13,15	6,90	0,51	13,02	3,98	2,46	0,59	19,08	7,80	1,20	10,79	2,94	2,33	0,60	
80	0	11,79	7,17	0,50	11,09	3,70	3,21	0,61	25,50	6,73	0,79	6,00	2,58	2,60	0,50	
80	60	12,14	7,33	0,69	11,59	4,06	3,40	0,64	23,36	8,07	1,18	9,53	2,98	2,69	0,66	
80	120	16,38	7,60	0,66	13,91	3,41	3,94	0,69	21,56	7,47	0,95	9,70	2,65	2,75	0,61	
80	180	11,77	6,73	0,56	13,05	4,07	2,31	0,62	33,95	7,13	0,93	8,78	2,80	2,08	0,52	
160	0	13,85	6,57	0,46	10,98	3,55	2,74	0,58	22,63	8,23	1,00	6,85	3,08	2,78	0,63	
160	60	14,60	7,40	0,52	12,77	3,65	3,30	0,63	23,36	7,67	1,01	8,17	2,83	2,82	0,58	
160	120	12,35	7,27	0,61	11,55	3,92	3,53	0,64	20,23	7,90	0,98	8,60	2,74	2,77	0,60	
160	180	15,42	7,07	0,53	11,63	3,79	2,62	0,60	22,53	7,63	1,09	9,22	3,18	2,41	0,64	
240	0	12,64	8,10	0,49	11,28	3,86	2,60	0,67	23,11	8,27	0,97	7,54	3,20	2,44	0,65	
240	60	12,36	7,93	0,50	13,82	3,60	2,49	0,65	19,41	7,43	0,88	7,85	2,88	2,16	0,58	
240	120	10,71	8,17	0,57	13,37	3,38	2,50	0,67	26,71	8,53	0,89	8,64	2,78	2,48	0,64	
240	180	11,34	7,80	0,50	13,45	3,68	2,57	0,63	29,71	8,23	0,92	8,60	2,64	2,35	0,59	
CV (%)			14,38	31,15	14,07	9,60	30,28	10,92		11,42	16,64	13,05	9,12	18,11	9,27	
F.V.	G. L.															
Rep	2															
N	3		*	ns	ns	ns	ns	*		ns	*	ns	ns	ns	ns	
K ₂ O	3		ns	ns	*	ns	ns	ns		ns	ns	***	ns	ns	ns	
N x K ₂ O	9		ns	ns	ns	ns	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns	*	

***, **, * e ns significativo a 0,1; 1 e 5 % de probabilidade e não significativo, respectivamente.

TABELA 5. Modelos de regressão ajustados para teores foliares e extração de macronutrientes do sorgo CMSXS 7020 em função das doses de NK, nas safras 2010/2011 e 2011/2012.

Avaliação	Safra	Nutriente	Fonte de variação	Equação	R2
Teor foliar	2010/2011	N	ns		
		P	N/K0	$y = -0,00002^{**}N^2 + 0,0066^{**}N + 2,87$	0,63
			K/N240	sem ajuste	
		K	N	$y = 0,0053^{**}N + 14,18$	0,76
			K	$y = 0,0086^{***}K + 14,35$	0,78
		Ca	N	$y = -0,0032^{***}N + 8,60$	0,97
			K	$y = 0,00004^{*}K^2 - 0,0095^{*}K + 8,49$	0,63
	Mg	N	$y = -0,0033^{***}N + 3,99$	0,99	
	S	N	$y = 0,0003^{*}N + 2,04$	0,51	
	2011/2012	N	N	$y = 0,0064^{*}N + 28,89$	0,68
		P	ns		
		K	ns		
		Ca			
		Mg	N/K0	$y = -0,0024^{**}N + 3,39$	0,69
K/N0			$y = -0,0041^{***}K + 3,49$	0,96	
S		ns			
Extração	2010/2011	N	ns		
		P	ns		
		K	K	$y = -0,0001^{*}K^2 + 0,0345^{**}K + 10,44$	0,80
		Ca	ns		
		Mg	N	$y = -0,0011^{**}N + 1,87$	0,70
	S	ns			
	2011/2012	N	K	$y = -0,0039^{*}K + 9,09$	0,76
		P	ns		
		K	K	$y = -0,0001^{*}K^2 + 0,0406^{**}K + 9,58$	0,99
		Ca	K	$y = 0,00003^{*}K^2 - 0,0088^{*}K + 4,73$	0,78
Mg		K	$y = -0,0030^{***}K + 3,03$	0,91	
S	K	$y = -0,0003^{*}K + 0,78$	0,56		

***, **, * e ns significativo a 0,1, 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

TABELA 6. Modelos de regressão ajustados para teores foliares e extração de macronutrientes do sorgo CMSXS 652 em função das doses de NK, nas safras 2010/2011 e 2011/2012

Avaliação	Nutrientes	Fonte de variação	Equação	R2	
Teor foliar	N	ns			
	P	N/K0	$y = -0,00002^{**}N^2 + 0,0066^{**}N + 2,87$	0,63	
		K/N240	sem ajuste		
	K	N	$y = 0,0053^{**}N + 14,18$	0,76	
		K	$y = 0,0086^{***}K + 14,35$	0,78	
	Ca	N	$y = -0,0032^{***}N + 8,60$	0,97	
		K	$y = 0,00004^{*}K^2 - 0,0095^{*}K + 8,49$	0,63	
	Mg	N	$y = -0,0033^{***}N + 3,99$	0,99	
	S	N	$y = 0,0003^{*}N + 2,04$	0,51	
	2011/2012	N	N	$y = 0,0064^{*}N + 28,89$	0,68
		P	ns		
		K	ns		
		Ca			
		Mg	N/K0	$y = -0,0024^{**}N + 3,39$	0,69
K/N0			$y = -0,0041^{***}K + 3,49$	0,96	
S		ns			
Extração		N	ns		
		P	ns		
		K	K	$y = -0,0001^{*}K^2 + 0,0345^{**}K + 10,44$	0,80
	Ca		ns		
	Mg	N	$y = -0,0011^{**}N + 1,87$	0,70	
	S	ns			
	N	K	$y = -0,0039^{*}K + 9,09$	0,76	
		P	ns		
	2011/2012	K	K	$y = -0,0001^{*}K^2 + 0,0406^{**}K + 9,58$	0,99
		Ca	K	$y = 0,00003^{*}K^2 - 0,0088^{*}K + 4,73$	0,78
Mg		K	$y = -0,0030^{***}K + 3,03$	0,91	
S		K	$y = -0,0003^{*}K + 0,78$	0,56	

***, **, * e ns significativo a 0,1, 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

duas safras). Franco (2011) obteve produtividade de 18 Mg ha⁻¹ de matéria seca com sorgo forrageiro e extrações bem superiores para N, P, K, Ca e S (16,6; 3,0; 18,1; 5,7 e 1,1 kg Mg⁻¹ de MS, respectivamente) e inferior para Mg (1,9 kg Mg⁻¹ de matéria seca). Extrações elevadas também foram obtidas por Rodrigues Filho et al. (2006) nos valores de 5,7; 5,0 e 5,2 kg Mg⁻¹ de matéria seca para o P, Ca e Mg, sendo que a produtividade obtida foi de 15 Mg ha⁻¹ de matéria seca.

Sabe-se que a extração de nutrientes pelas plantas está relacionada com a produtividade de matéria seca, a cultivar, o solo, entre outros fatores, de forma que essas variações são normais quando se trata de sistemas produtivos. De qualquer forma, é possível calcular um valor médio de extração com bases em todos os trabalhos citados anteriormente: 12,0; 3,0; 12,5; 4,2; 2,9 e 1,1 kg Mg⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, para produtividade média de 16,5 Mg ha⁻¹ de matéria seca.

Conclusão

A adubação com os nutrientes N e K aumentou os teores foliares de N, P, K e S e diminuiu os de Ca e Mg. Quanto à extração de nutrientes, houve aumento da extração de N, K e S por tonelada de matéria seca de sorgo produzida e redução de P, Ca e Mg com a aplicação de doses de N e K. A nutrição adequada e o aumento das extrações de N e K pela planta com a aplicação dos fertilizantes nitrogenados e potássicos sugerem maior produção de etanol de segunda geração.

Agradecimentos

À Fapemig, pelo apoio financeiro.

Referências

- ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; TARDIN, F. D. **Utilização de sorgo para a produção de biocombustível**. 2009. Disponível em: <http://www.agrolink.com.br/noticias/NoticiaDetalhe.aspx?codNoticia=103157>. Acesso em: 6 nov. 2014.
- ALBUQUERQUE, P. E. P.; LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D.P. **Aplicativo computacional “Irrigafácil” versão 2.0 implementado via web para o manejo de irrigação de algumas culturas anuais em Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos,164).
- BARBANTI, L.; GRANDI, S.; VECCHI, A.; VENTURI, G. Sweet and fibre sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 25, p. 30-39, 2006.
- CARELLI, M. L. C.; UNGARO, M. R. G.; FAHL, I. NOVO, M. C. S. S. Níveis de nitrogênio, metabolismo, crescimento e produção de girassol. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 123-130, 1996.
- CARVALHO, F. T. **Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do milho**. 93 f. 2000. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, MG.
- CASEY, G. P.; MAGNUS, C. A.; INGLEDEW, W. M. High-gravity brewing: effects of nutrition on yeast composition, fermentative ability, and alcohol production. **Applied and Environmental Microbiology**, Baltimore, v. 48, n. 3, p. 639-646, 1984.

- CIANCIO, N. H. R. **Produção de grãos, matéria seca e acúmulo de nutrientes em culturas submetidas à adubação orgânica e mineral**. 2010. 86 f. (Tese de Mestrado) -Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. Seja o Doutor do seu sorgo. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 24 p. (Arquivo do Agrônomo, 14). **Encarte do Informações Agronômicas**, n. 100, dez. 2002.
- FAO. FAOSTAT 2012 **Coarse Grains**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 4 jun. 2014.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FRANCO, A. A. N. **Marcha de absorção, e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011. 74 f. (Tese de Mestrado) - Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros.
- GARDNER, J. C.; MARANVILLE, J. W.; PAPAROZZI, E. T. Nitrogen use efficiency among diverse sorghum cultivars. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 728-733, 1994.
- HILL, J.; POLASKY, S.; NELSON, E.; TILMAN, D.; HUO, H.; LUDWIG, L.; NEUMANN, J.; ZHENG, H.; BONTA, D. Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 106, n. 6, p. 2077-2082, 2009.
- KALMOKOFF, M. L.; INGLEDEW, W. M. Evaluation of ethanol tolerance in selected *Saccharomyces* strain. **Journal of American Society of Brewing Chemistry**. Saint Paul, v. 43, p. 189-196, 1985.
- MACEDO, I. C.; NOGUEIRA, L. A. H. **Biocombustíveis**. 1. ed. Brasília, DF: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. 2005. v. 1, 233 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARANVILLE, J. W.; MADHAVAN, S. Physiological adaptations for nitrogen use efficiency in sorghum. **Plant and Soil**, The Hague, v. 245, p. 25-34, 2002.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. London: **Academic Press**, 1997. 889 p.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 143-168.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.
- OLIVEIRA, L. B.; PIRES, A. J. V.; VIANA, A. E. S.; MATSUMOTO, S. N.; CARVALHO, G. G. P.; RIBEIRO, L. S. O. Produtividade, composição química e características agronômicas de diferentes forrageiras. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 39, n. 12, p. 2604-

- 2610, 2010.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- RESENDE, A. V.; COELHO, A. M.; RODRIGUES, J. A. S.; SANTOS, F. C. **Adubação maximiza o potencial produtivo do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 119).
- RODRIGUES FILHO, O.; FRANÇA, A. F. S.; OLIVEIRA, R. P.; OLIVEIRA, E. R.; ROSA, B.; SOARES, T. V.; MELLO, S. Q. S. Produção e composição bromatológica de quatro híbridos de sorgo forrageiro [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] submetidos a três doses de nitrogênio. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 7, n. 1, p. 37-48, 2006.
- SANTI, A.; CAMARGOS, S. L.; SCARAMUZZA, W. L. M. P. Deficiências de macro nutrientes em sorgo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 228-233, 2006.
- SANTOS, F. C.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SEDIYAMA, C. S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1661-1674, 2008.
- SILVA, J. A.; SILVA, F. L. H.; ALVES, R. R. N.; SANTANA, D. P. Influência das variáveis nitrogênio, fósforo e Brix na produção de metabólitos secundários contaminantes totais da fermentação alcoólica. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 695-698, 2006.
- STICKLEN, M. B. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. **Nature Reviews Genetics**, London, v. 9, n. 6, p. 433-443, 2008.
- TEDESCO, M. J.; WOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 188 p.
- URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Produção de biocombustíveis: a questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 14, n. 5, p. 42-46, 2005.