

Uptake and exportation of micronutrients in high productivity corn fields

Absorção e exportação de micronutrientes em lavouras de milho de alta produtividade

Tháísa Fernanda Oliveira^{1*}, Isabella Alves da Silva Fonseca², Guilherme Antônio Vieira de Andrade², Victor Jordão Braga Oliveira², Maria Elisa Paraguassu Soares², Leonardo Angelo de Aquino³

Abstract: High yield corn has an increased demand for micronutrients, which requires updating knowledge of the nutritional demand patterns of the crop, especially under high production conditions. The objective of the current study was therefore to determine the absorption and export patterns of copper (Cu), manganese (Mn), zinc (Zn) and iron (Fe) for high yield corn crops. Fifteen corn fields with high productive potential were sampled in the Alto Paranaíba, region, Minas Gerais, in the agricultural year 2014-2015. The following variables were evaluated: productivity, plant population, rows of grain per ear, grain per row, grain per ear, mass of one thousand grains, vegetation dry mass, dry mass of grains and total dry mass of the plant, besides the accumulation of micronutrients in the vegetative part and grains, and total micronutrient accumulation per whole plant. The grain and Cu, Mn, Zn and Fe harvest indices were also calculated. The data were submitted to descriptive statistics, Pearson coefficient linear correlation was calculated at the 5% level and submitted to regression analysis. Cu and Zn absorption and export increase linearly with increased productivity. Micronutrient accumulation in high productivity maize is, in decreasing order, in the vegetative part: Fe > Mn > Zn > Cu; while in the grains and in the whole plant: Fe > Zn > Mn > Cu. Zn is the micronutrient with the highest harvest index.

Key words: Copper. Iron. Manganese. *Zea mays*. Zinc.

Resumo: Com a obtenção de altas produtividades de milho aumenta também a demanda por micronutrientes, o que reforça a necessidade de se atualizarem os padrões de demanda nutricional da cultura, sobretudo para condições de lavouras de alto desempenho. Assim, objetivou-se determinar os padrões de absorção e exportação de cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe) para lavouras de milho de alta produtividade. Foram amostrados quinze talhões de milho que apresentaram alto potencial produtivo, na região do Alto Paranaíba – MG, no ano agrícola 2014/2015. Dessas amostras, avaliou-se as seguintes variáveis: produtividade, população de plantas, fileiras de grãos por espiga, grãos por fileira, grãos por espiga, massa de mil grãos, massa seca vegetativa, massa seca de grãos e massa seca total da planta, além do acúmulo dos micronutrientes na parte vegetativa, nos grãos, e total acumulado na planta. Calculou-se também o índice de colheita de grãos e de Cu, Mn, Zn e Fe. Os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva, medida a correlação linear do coeficiente de Pearson a 5% e submetidos a análise de regressão. A absorção e exportação de Cu e Zn aumentam linearmente com o aumento da produtividade. O acúmulo de micronutrientes em milho de alta produtividade é, em ordem decrescente, na parte vegetativa: Fe > Mn > Zn > Cu; enquanto nos grãos e na planta inteira: Fe > Zn > Mn > Cu. O Zn é o micronutriente com maior índice de colheita.

Palavras-chave: Cobre. Ferro. Manganês. *Zea mays*. Zinco.

*Corresponding author

Submitted for publication on 07/12/2018 and approved 03/03/2019

¹Discente of the Federal University of Lavras – Department of Agriculture. Aqueanta Sol, Zip Code: 37200-000, Lavras – MG. thaisfernanda135@gmail.com

²Professor of the Federal University of Viçosa – Rio Paranaíba Campus, Institute of Agrarian Sciences. isabella.a.silva31@gmail.com, guilherme.a.vieira@ufv.br, victor.jordao.oliveira@gmail.com, maria.paraguassu@gmail.com,

³Docente of the Federal University of Viçosa – Rio Paranaíba Campus, Institute of Agrarian Sciences. aquino.ufv@gmail.com

INTRODUCTION

The Brazilian production of corn (*Zea mays* L.) in the 2017/2018 harvest was approximately 81 million tons, coming from a planted area of 17 million hectares (CONAB, 2018). Despite the high production potential of corn to exceed 12 t ha⁻¹ in the Alto Paranaíba-MG region (Gott *et al.* 2014), Brazil overall has low productivity, with a mean of 4.9 t ha⁻¹ (CONAB, 2018).

High yields are mainly due to the technological advances in recent years, including the use of biotechnological tools and genetically superior hybrids, as well as the adoption of efficient agronomic practices (BENDER *et al.*, 2013). On the other hand, one of the factors contributing to the generally low corn yield in Brazil is soil fertility, since, in addition to some areas with low nutrient content, fertilization is still practiced inefficiently. In addition, most fertilizer regimes do not consider how nutrient demand varies with productivity (VALDERRAMA *et al.*, 2011).

When studying the nutritional demands of corn, special attention should be paid to micronutrient fertilization. These, even when extracted in small quantities, are of great importance, since they play a vital role in plant metabolism, being central to metabolic and enzymatic activation. In addition, they act as cofactors and are an integral part of many enzymes that operate during seed germination (HAFERKAMP; LINKA, 2012; PINTO; FERREIRA, 2015).

Among the micronutrients, those absorbed as cations include copper, iron, manganese and zinc. In highly weathered, dystrophic soils with high adsorption power, these elements are available in very low concentrations in the soil solution, so low that plants frequently manifest deficiency symptoms (MARTINS *et al.*, 2003; BORGES *et al.*, 2009; FERREIRA, 2015).

The demand for micronutrients increases as higher levels of productivity are reached (VON PINHO *et al.*, 2009; BENDER *et al.*, 2013), which reinforces the need to update information on the nutritional demand patterns of the crop concerned. This is especially true for high performance crops since, even on good fertility soils, fertilizers must at least replenish what is exported when the grain is harvested.

The replacement of these micronutrients is necessary to maintain the high levels of productivity in view of the great extent to which they are exported (FARIA, 2014). For effective replenishment, it is necessary, in addition to knowing the in-soil micronutrient dynamics, it is important to study micronutrient accumulation in the grains, as well as in the vegetative parts, since high productivity farming often suffers from a judicious adjustment of fertilizer application.

INTRODUÇÃO

A produção brasileira de milho (*Zea mays* L.) na safra 2017/2018 foi de aproximadamente 81 milhões de toneladas, referentes a área plantada de 17 milhões de hectares (CONAB, 2018). Apesar do alto potencial produtivo do milho, como observado por Gott *et al.* (2014), superiores a 12 t ha⁻¹ na região do Alto Paranaíba- MG, o Brasil possui produtividade baixa, com média de 4,9 t ha⁻¹ (CONAB, 2018).

As altas produtividades são devidas principalmente ao avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos, caracterizado pelo uso de ferramentas de biotecnologia, híbridos geneticamente superiores, bem como a adoção de práticas agrônomicas eficientes (BENDER *et al.*, 2013). Por outro lado, um dos fatores que contribuem para a baixa produtividade de milho no Brasil é a fertilidade dos solos, visto que, além de algumas áreas possuírem baixos teores de nutrientes, ainda se pratica adubação de forma inadequada. Em sua maioria, as adubações realizadas não consideram a variação da demanda por nutrientes com a produtividade (VALDERRAMA *et al.*, 2011).

Ao estudar a demanda nutricional da cultura do milho, uma atenção especial deve ser dada às adubações com micronutrientes, em que, mesmo extraídos em menores quantidades, possuem elevada importância, pois desempenham funções vitais no metabolismo das plantas, fazendo parte de compostos responsáveis por processos metabólicos e da ativação enzimática. Além disso, eles agem como co-fatores e são parte integrante de muitas enzimas que atuam durante a germinação das sementes (HAFERKAMP; LINKA, 2012; PINTO; FERREIRA, 2015).

Dentre os micronutrientes, destacam-se os que são absorvidos na forma de cátions, ou seja, cobre, ferro, manganês e zinco. Em solos altamente intemperizados, distróficos e com elevado poder de adsorção, esses elementos se apresentam em baixas concentrações na solução do solo, levando a manifestações frequentes de sintomas de deficiência nas plantas (MARTINS *et al.*, 2003; BORGES *et al.*, 2009; PINTO; FERREIRA, 2015).

A demanda por micronutrientes aumenta à medida que níveis crescentes de produtividade são alcançados (VON PINHO *et al.*, 2009; BENDER *et al.*, 2013), o que reforça a necessidade de se atualizarem os padrões da demanda nutricional da cultura, sobretudo para condições de lavouras de alto desempenho. E mesmo em solos de boa fertilidade, as adubações devem, ao menos, repor o que for exportado com a colheita dos grãos.

A reposição desses micronutrientes torna-se necessária para manter os altos níveis de produtividade diante dos altos níveis de exportação dos mesmos (FARIA, 2014). Para reposição é necessário, além de conhecer a dinâmica dos micronutrientes no solo, estudar o acúmulo destes nos grãos, bem como na parte vegetativa, uma vez que altas produtividades carecem do ajuste criterioso das fertilizações.

Therefore, a knowledge of macro- and micronutrient absorption and export patterns needs to be part of any high-yield crop management plan. Accordingly, the current study was designed to determine the absorption and export patterns of Cu, Mn, Fe and Zn in high productivity corn crops.

MATERIALS AND METHODS

In the agricultural year 2014/2015, fifteen corn plots cultivated using a conventional system and with high productive potential were sampled in the municipalities of Campos Altos, Rio Paranaíba and São Gotardo, in the region of Alto Paranaíba – Minas Gerais state, Brazil, at altitudes between 1,000 and 1,200 m. Co-ordinates and altitudes of the plots were: Field 1 to 4 - 19°12'03" S, 46°10'11" W and altitude of 1131 m; field 5 and 6 - 19°29'23" S, 46°11'41" W and altitude of 1186 m; field 7 to 11 - 19°12'26" S, 46°07'08" W and altitude of 1111 m; field 12 - 19°14'23" S, 46°18'46" W and altitude of 944 m; field 13 to 15 - 19°16'38" S, 46°18'32" W and altitude of 912 m. Historically, carrot, onion, garlic and potato were cultivated in rotation grains crops such as corn, soybean and wheat.

According to the Köppen classification the region climate is of the Aw type, defined as tropical with a dry season. Soils are classified as Red-Yellow Latosol, clayey texture (EMBRAPA, 2013). The soil chemical characteristics of the sampled areas are presented in Table 1.

For dry matter determination and micronutrient extraction plants were collected when physiological maturity was reached. In each study plot, 20 plants were randomly sampled at five points, located in a homogeneous subarea of the 50 x 50 m field. At each point, four consecutive plants were cut close to the ground.

In selected plots of the same soil type whose difference was the cultivated hybrid and the adopted population. Table 2 shows the information on hybrids used and main cultivational treatments used for the studied plots.

Corn plants were subdivided into productive material (grains) and vegetative material (leaves, stem, tassel, ear and the modified leaf of ear). Vegetative material was macerated, homogenized, weighed, and then a sub-sample removed.

Grains were also weighed and a sub-sample was taken. To remove moisture, vegetative material samples and of grains were dried in a forced air circulation oven at 70 °C for 72 h until a constant mass was obtained. Samples were then weighed to obtain the mass of dry matter (grains, vegetative and total). Values obtained were extrapolated to obtain the mass per hectare.

Portanto, o conhecimento dos padrões de absorção e exportação de macro e micronutrientes precisa fazer parte do plano de manejo das áreas de cultivo. Desse modo, propõe-se com este trabalho determinar os padrões de absorção e exportação de Cu, Mn, Fe e Zn em lavouras de milho de alta produtividade.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram amostrados aleatoriamente, no ano agrícola 2014/2015, quinze talhões de milho cultivados sob sistema convencional e que apresentavam alto potencial produtivo, nos municípios de Campos Altos, Rio Paranaíba e São Gotardo, na região do Alto Paranaíba – MG, Brasil, com altitudes entre 1.000 e 1.200 m. Coordenadas e altitudes do talhões: Lavouras 1 a 4 - 19°12'03" S 46°10'11" W e altitude de 1131 m; Lavouras 5 e 6 - 19°29'23" S 46°11'41" W e altitude de 1186 m; Lavouras 7 a 11 - 19°12'26" S 46°07'08" W e altitude de 1111 m; Lavoura 12 - 19°14'23" S 46°18'46" W e altitude de 944 m; Lavoura 13 a 15 - 19°16'38" S 46°18'32" W e altitude de 912 m. No histórico da área, foram cultivadas olerícolas (cenoura, cebola, alho e batata) em rotação com cultivo de grãos (milho, soja e trigo).

O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, definido como tropical com estação seca. Os solos das lavouras são da classe Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa (EMBRAPA, 2013). As características químicas do solo das áreas amostradas estão apresentadas na Tabela 1.

Foram coletadas plantas na fase de maturidade fisiológica para determinação da matéria seca e extração de micronutrientes. Em cada área selecionada foram amostradas aleatoriamente 20 plantas em cinco pontos. Em cada ponto, quatro plantas consecutivas foram cortadas rente ao solo. Os pontos estavam inseridos numa subárea homogênea do talhão de 50 x 50 m.

Alguns talhões encontravam-se no mesmo solo cuja diferença era o híbrido cultivado e a população adotada. Na Tabela 2 são apresentadas as informações sobre híbridos utilizados e principais tratamentos culturais nos talhões estudados.

As plantas de milho foram subdivididas em material produtivo (grãos) e material vegetativo (folhas, colmo, pendão, sabugo e folha modificada da espiga). O material vegetativo foi picado em forrageira, homogeneizado, pesado e, em seguida, retirou-se uma amostra.

Os grãos também foram pesados e retirada uma amostra. Para eliminação total da umidade, as amostras de material vegetativo e de grãos foram acondicionadas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 70 °C durante 72 h até a obtenção da massa constante. Em seguida, as amostras foram pesadas para obter a massa de matéria seca (grãos, vegetativa e total). Os valores obtidos foram extrapolados para se obter a massa por hectare.

Table 1 - Chemical characterization of in the 0 to 0.20 m layer of soils under high-yield corn
Tabela 1 - Caracterização química dos solos na camada de 0 a 0,20 m de profundidade de áreas cultivadas com milho de alta produtividade

Characteristics	Unit	Soil						
		1	2	3	4	5	6	7
pH (H ₂ O)	-	5.5	6.3	6.3	6.5	5.5	6.2	5.4
M.O.	dag kg ⁻¹	3.2	4.1	2.6	2.2	2.4	2.4	3.9
P-rem	mg L ⁻¹	24.7	13.0	13.0	14.4	15.8	11.3	30.2
P (Mehlich ⁻¹)	mg dm ⁻³	10.5	51.0	45.0	17.2	10.4	43.7	26.9
K	mg dm ⁻³	131	137	125	64	91	253	112
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	3.2	4.3	4.3	5.2	3.0	3.8	3.5
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0.9	1.1	0.6	1.3	0.9	0.8	0.9
S	mg dm ⁻³	29	54	18	24	29	12	19
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0.27	-	-	-	0.2	-	0.32
H+Al	cmol _c dm ⁻³	6.10	3.65	3.24	2.6	5.60	2.83	6.59
SB	cmol _c dm ⁻³	4.43	5.75	5.22	6.66	4.13	5.25	4.46
t	cmol _c dm ⁻³	4.70	5.75	5.22	6.66	4.33	5.25	5.01
T	cmol _c dm ⁻³	10.53	9.40	8.46	9.26	9.73	8.08	11.28
B	mg dm ⁻³	0.7	0.9	0.9	0.7	0.7	1.1	0.7
Zn	mg dm ⁻³	1.4	8.4	8.6	1.4	1.2	10.6	3.1
Fe	mg dm ⁻³	32.0	42.0	45.0	30.0	31.0	25.2	30.0
Mn	mg dm ⁻³	5.9	5.3	7.1	11.7	11.3	14.9	16.9
Cu	mg dm ⁻³	3.5	7.8	3.2	1.2	1.2	7.3	2.0

Extraction methods: P and K – Mehlich – 1; Ca²⁺, Mg²⁺ and Al³⁺ – KCl 1 mol L⁻¹; B – hot water; Cu, Fe, Mn and Zn – DTPA pH 7.3; S - Monobasic Calcium Phosphate 0.01 mol L⁻¹; M.O. - Walkley-Black.

Method. Extratores: P e K – Mehlich – 1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ – KCl 1 mol L⁻¹; B – água quente; Cu, Fe, Mn e Zn – DTPA pH 7,3; S - Fosfato monobásico de cálcio 0,01 mol L⁻¹; M.O. - Método Walkley-Black.

Productivity was estimated by the collection of 20 plants and their cobs, which were threshed and a 0.5 kg sample was taken. Mass was evaluated after oven drying, and production per hectare extrapolated. The number of rows per ear (RE), number of grains per row (GR) and number of grains per ear, obtained as the product of RE and GR were also determined. Mass of 1000 grains was obtained by manual counting of four replicates of 250 grains, which were dried until constant mass was achieved. For the variables mass of one thousand grains and productivity, moisture was corrected to 13% wet weight.

After drying, the plant material was ground in a Wiley Mill equipped with a 1.27 mm sieve, and Cu, Mn, Zn and Fe contents determined according to methods described by Silva (2009). Cu, Mn, Zn and Fe content of the vegetative parts and grains were estimated by the product of the contents of the respective nutrients and dry matter mass, expressed as g ha⁻¹.

A produtividade foi estimada pela coleta de 20 plantas e de suas espigas, que foram debulhadas e retirada uma amostra de 0,5 kg que, após seca em estufa, foi avaliada a massa e extrapolada a produção por hectare. Determinaram-se também o número de fileiras por espiga (FE), o número de grãos por fileira (GF) e o número de grãos por espiga, obtido pelo produto entre FE e GF. A massa de 1000 grãos foi obtida pela contagem manual de quatro repetições de 250 grãos, os quais foram secos até detecção da massa constante e realizada a medida em balança de precisão. Para as variáveis massa de mil grãos e produtividade, a umidade foi corrigida para 13% de base úmida.

Após a secagem, o material vegetal foi triturado em moinho Wiley equipado com peneira de 1,27 mm para determinação dos teores de Cu, Mn, Zn e Fe de acordo com métodos descritos por Silva (2009). Os conteúdos de Cu, Mn, Zn e Fe na parte vegetativa e nos grãos foram estimados pelo produto entre os teores dos respectivos nutrientes e a massa de matéria seca, sendo expressos em g ha⁻¹.

Table 2 - Hybrids and main cultural treatments used for each of the plots cultivated with high productivity corn
Tabela 2 - Híbridos e principais tratamentos culturais adotados em cada um dos talhões cultivados com milho de alta produtividade

Field	Soil	Hybrid	Population (Plants ha ⁻¹)	Spacing (m)	PD	HD	FD			FG	
							N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	K ₂ O
							(kg ha ⁻¹)				
1	1	Plot P30F53YH	68500	0.6	28/oct	19/apr	28	105	35	165	0
2	1	P3456H	66700	0.6	28/oct	19/apr	28	105	35	165	0
3	1	P3779H	69200	0.6	28/oct	19/abr	28	105	35	165	0
4	1	P3630H	65000	0.6	28/oct	19/abr	28	105	35	165	0
5	2	P30F53YH	63750	0.8	25/oct	26/abr	20	94	0	216	60
6	3	P30F53YH	68500	0.8	15/out	12/apr	20	94	0	216	60
7	4	P3456H	70500	0.5	23/out	02/may	24	90	30	184	150
8	4	P3779H	83500	0.5	23/out	02/may	24	90	30	184	150
9	4	P3630H	80000	0.5	23/out	02/may	24	90	30	184	150
10	5	2B810 Pw	66400	0.5	23/out	02/may	24	90	30	170	80
11	5	DKB310VTPro 2	65000	0.5	23/out	02/may	24	90	30	170	80
12	6	P30F53YH	65500	0.5	20/out	25/mar	18	66	22	126	0
13	7	P30F53YH	66500	0.5	25/out	05/may	32	126	72	113	0
14	7	30A37 Pw	71500	0.5	25/out	05/may	32	126	72	113	0
15	7	DKB310 VTPro 2	70500	0.5	25/out	05/may	32	126	72	113	0

Planting date (PD); Harvesting date (HD); Fertilized at planting (FP); Fertilized at germination (FG).

Data de semeadura (PD); Data de colheita (HD); Adubação de semeadura (FP); Adubação de cobertura (FG).

The harvest index, based on the dry matter mass, was calculated from the ratio between the mass dry matter yield and total dry matter mass. Micronutrient harvest indexes were calculated using the ratio between the accumulation of the respective nutrients in the grains by total accumulation in the plant.

Data were submitted to descriptive analysis to obtain the mean, maximum and minimum values and coefficient of variation. The linear correlation coefficient for the Pearson Coefficient (set at 5% probability) was used to determine the relationship between the analyzed variables. Regression equations were adjusted to explain the variation in micronutrient extraction and export, as a function of grain yield.

RESULTS AND DISCUSSION

The average yield of 15 t ha⁻¹ is well above the Brazilian average of 4.9 t ha⁻¹ (CONAB, 2018), and also exceeds the United States average of 12.6 t ha⁻¹ (USDA, 2018), there being a minimum of 13 t ha⁻¹ and a maximum of 18 t ha⁻¹ in the sampled plots (Table 3). Vegetative dry matter, grain mass and total, as well as the amount of micronutrients (Cu, Mn, Fe and Zn) accumulated in the vegetative part, grains and total, are given in Table 3, together with the harvest index for each nutrient.

O índice de colheita, com base na massa de matéria seca, foi calculado pela razão entre a produção de massa de matéria seca de grãos e a massa da matéria seca total. Os índices de colheita dos micronutrientes foram calculados pela razão entre o acúmulo do respectivo nutriente nos grãos pelo acúmulo total na planta.

Os dados obtidos foram submetidos à análise descritiva para obter a média, valores máximos e mínimos e coeficiente de variação. A medida da correlação linear do coeficiente de Pearson serviu para determinar a relação entre as variáveis analisadas, a 5% de probabilidade. Ajustaram-se as equações de regressão para explicar a variação da extração e exportação de micronutrientes em função da produtividade de grãos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade média obtida, de 15 t ha⁻¹, está acima da média do Brasil, que é de 4,9 t ha⁻¹ (CONAB, 2018), e também da média dos Estados Unidos, de 12,6 t ha⁻¹ (USDA, 2018), apresentando nos talhões amostrados valor mínimo de 13 t ha⁻¹ e máximo de 18 t ha⁻¹ (Tabela 3). A matéria seca vegetativa, massa de grãos e total, bem como a quantidade dos micronutrientes (Cu, Mn, Fe e Zn) acumulados na parte vegetativa, grãos e total, estão apresentados na Tabela 3, juntamente com o índice de colheita de cada nutriente.

Table 3 - Productivity, plant population, number of rows per ear, number of grains per row, number of grains per ear, mass of one thousand grains, dry mass of grains, dry mass, total dry mass, Cu, Fe, Zn and Mn in the vegetative part, in the grains and total, harvest indexes for the assayed corn plant micronutrients and grain harvest indexes

Tabela 3 - Produtividade, população de plantas, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, massa de mil grãos, massa seca de grãos, massa seca vegetativa, massa seca total, acúmulo de Cu, Fe, Zn e Mn na parte vegetativa, nos grãos e total, índices de colheita para estes micronutrientes em plantas de milho e índices de colheita de grãos

Variables	Minimum	Medean	Maximummo	CV
Produtivity (t ha ⁻¹)	13	15	18	8.8
Plants population	63.750	69.403	83.500	7.9
Rows per ear	15	17	20	10.2
Grains per row	31	36	40	8.1
Grains per ear	551	628	720	8.2
Mass of 1000 grains (g)	243	319	353	9.9
Dry vegetation mass (kg ha ⁻¹)	10.293	12.320	15.696	11.6
Dry grain mass (kg ha ⁻¹)	10.914	13.326	15.967	8.8
Total dry mass (kg ha ⁻¹)	21.207	25.646	29.259	7.8
Grain harvest index (kg kg ⁻¹)	0.46	0.52	0.57	4.7
Cu accumulated, vegetative part (g ha ⁻¹)	81	134	198	24.54
Cu accumulated in grains (g ha ⁻¹)	41	98	156	41.8
Cu, total accumulated (g ha ⁻¹)	129	232	303	22.6
Mn accumulated, vegetative part (g ha ⁻¹)	281	442	562	19.3
Mn accumulated in grains (g ha ⁻¹)	72	137	198	29.3
Mn total accumulated (g ha ⁻¹)	422	578	690	13.7
Fe accumulated, vegetative part (g ha ⁻¹)	4140	8689	12935	32.1
Fe accumulated in grains (g ha ⁻¹)	396	1025	2997	63.9
Fe total accumulated (g ha ⁻¹)	6021	9714	13935	25.8
Zn accumulated, vegetative part (g ha ⁻¹)	91	208	396	40.0
Zn accumulated in grains (g ha ⁻¹)	206	398	562	27.6
Zn total accumulated (g ha ⁻¹)	331	606	868	29.0
Cu (g g ⁻¹) Harvest Index	0.22	0.41	0.59	28.0
Mn (g g ⁻¹) Harvest Index	0.14	0.24	0.39	32.5
Fe (g g ⁻¹) Harvest Index	0.04	0.12	0.33	78.0
Zn (g g ⁻¹) Harvest Index	0.54	0.66	0.82	9.8

CV coefficients of variation, n= 15.

CV coeficiente de variação, n= 15.

The high yields in the sampled plots are due to the use of hybrids with genetic improvement, favorable conditions for the crop cultivation s, good husbandry, and soils with high fertility due to rotation with non-grain crops, which require well corrected soils with high nutriente availability s.

As altas produtividades nos talhões amostrados decorrem do uso de híbridos com melhoramento genético, condições favoráveis à condução das lavouras, boas práticas culturais, além de solos com alta fertilidade devido à rotação com olerícolas, as quais necessitam de solos bem corrigidos e com alta disponibilidade de nutrientes.

The average total accumulation of copper was 232 g ha⁻¹ (Table 3). This value is above the 125 g ha⁻¹ average reported by Duarte *et al.* (2003), but lower than the 300 g ha⁻¹ found by Borges *et al.* (2009). Accumulation in grains, for the minimum, medium and maximum values, was 41, 98 and 156 g ha⁻¹, respectively. Faria (2014) observed that, of 116 g ha⁻¹ Cu accumulated, 54 g ha⁻¹ was exported in grains and 62 g ha⁻¹ found in the rest of the plant. In the present study, grain export was almost 40% of the total accumulated, close to the value found by Faria (2014), which reached a mean grain yield of 12.2 t ha⁻¹.

For Mn, the total accumulation of this element by the plant was 578 g ha⁻¹ (Table 3). This value is lower than values obtained by Duarte *et al.* (2003) and Borges *et al.* (2009) (980 and 700 g ha⁻¹, respectively), but very close to the 501 g ha⁻¹ observed by Faria *et al.* (2014). For average accumulation values, 22% of accumulated Mn was exported in grains. This was also very close to the value obtained by Faria (2014), which was 23%. Productivity and nutrient accumulation by the grains and other parts of the plant directly influence the extraction of these elements (VON PINHO *et al.*, 2009).

The low Mn uptake can be explained by the sampled plots high pH, which consequently precipitates some of the Mn otherwise available to the plant (VALERI *et al.*, 2014). These authors, in a nutrient exclusion study, observed that in treatments with high pH this micronutrient was not available to the plants, and Mn leaf contents were small regardless of the application. On the other hand, a high accumulation of Fe in the aerial parts can also cause decrease in the absorption not only of the Mn, but also of other divalent cations, such as Zn and Cu (SCHMIDT *et al.*, 2009).

The mean value of Fe in the whole plant, 9.714 g ha⁻¹ (Table 3), was higher than the 4,640 g ha⁻¹ reported by Faria (2014), or the 5,650 g ha⁻¹ of Duarte *et al.* (2003). This increase in plant tissue Fe may have occurred due to the higher availability of this element in sampled plot soils, which is most likely due to the source material and the intensive preparation of the soil (SCHMID *et al.*, 2009, SCHMIDT *et al.*, 2013).

Average Fe export values were 11% higher than those obtained by Faria (2014), who reported an 8% export of total accumulated Fe. Higher Fe and Mn accumulation in the vegetative part was also observed by Valadares *et al.* (2014), who found higher levels when they fertilized corn with ammonium sulphate, which resulted in N-based soil acidification.

Considerando os valores médios de cobre observados nos talhões de milho, o acúmulo total deste elemento pela planta foi de 232 g ha⁻¹ (Tabela 3). Esse valor está acima da média encontrada por Duarte *et al.* (2003), que foi de 125 g ha⁻¹ de Cu, porém inferior àquela encontrada por Borges *et al.* (2009), que foi de 300 g ha⁻¹ de Cu. O acúmulo nos grãos, para os valores mínimo, médio e máximo, foi de 41, 98 e 156 g ha⁻¹, respectivamente. Faria (2014) observou que de 116 g ha⁻¹ de Cu acumulado, 54 g ha⁻¹ foram exportados pelos grãos e 62 g ha⁻¹ constituíram o restante da planta. No presente trabalho, a exportação pelos grãos foi próxima de 40% do total acumulado, próximo do valor encontrado por Faria (2014), que alcançou produção média de grãos de 12,2 t ha⁻¹.

Em relação ao Mn, o acúmulo total desse elemento pela planta foi de 578 g ha⁻¹ (Tabela 3). Esse valor é inferior aos valores obtidos por Duarte *et al.* (2003) e Borges *et al.* (2009), de 980 e 700 g ha⁻¹, respectivamente. Mas muito próximo ao observado por Faria *et al.* (2014), que foi de 501 g ha⁻¹. Pelos valores de acúmulo médio, 22% do acumulado foram exportados pelos grãos, também muito próximo do valor obtido por Faria (2014), que foi de 23%. A produtividade e o acúmulo de nutrientes nos grãos e em outras partes da planta influenciam diretamente a extração desses elementos (VON PINHO *et al.*, 2009).

Uma menor absorção de Mn pode ser explicada pelos talhões amostrados possuírem maior pH, que, consequentemente, precipita parte do Mn disponível para a planta (VALERI *et al.*, 2014). Esses autores, em estudo com omissão de nutrientes, observaram que nos tratamentos em que o pH foi elevado esse micronutriente não foi disponibilizado para as plantas, e os teores nas folhas foram menores independentemente da aplicação. Por outro lado, o maior acúmulo de Fe na parte aérea, também, pode causar diminuição na absorção não só do Mn, mas também de outros cátions divalentes, como Zn e Cu (SCHMIDT *et al.*, 2009).

O valor médio acumulado de Fe na planta inteira, 9.714 g ha⁻¹ (Tabela 3), foi maior que o encontrado por Faria (2014), de 4.640 g ha⁻¹, e por Duarte *et al.* (2003), de 5.650 g ha⁻¹. Esse maior acúmulo de Fe no tecido vegetal pode ter ocorrido devido à maior disponibilidade nos solos dos talhões amostrados, o que é explicado pelo material de origem e pelo preparo intensivo do solo (SCHMID *et al.*, 2009, SCHMIDT *et al.*, 2013).

A exportação média de Fe foi de 11%, superior ao obtido por Faria (2014), que determinou uma exportação de 8% do total de Fe acumulado. O maior acúmulo de Fe e Mn na parte vegetativa também foi observado por Valadares *et al.* (2014), que verificaram maiores teores quando adubaram o milho com sulfato de amônio, dada a acidificação causada por esta fonte de N.

Total Zn accumulation in the corn plants was 606 g ha⁻¹, lower than that found by Borges *et al.* (2009) for the hybrid GNZ2004 (2,630 g ha⁻¹). On the other hand, Duarte *et al.* (2003) and Faria (2014) reported average values of 331 and 490 g ha⁻¹, respectively, which are closer to that observed in the current study. It is also worth noting that the average export of Zn by grains was 66%, a value close to the 71% found by Faria (2014).

The average harvest index was 0.52 (Table 3), which is the efficiency of the plant in converting photoassimilates into production of harvested and commercialized parts (PAULO; ANDRADE, 2003). Silva *et al.* (2006) reported a mean value of 0.49. These values are within the range reported by Setiyono *et al.* (2010), which, with an experiment over several years and at different collection sites, reported variation in the corn harvest index from 0.17 to 0.62, with a mean of 0.50.

Vegetative dry matter mass (MSV) and productivity (PRO) did not show a significant correlation at 1 and 5% probability (Table 4). This differed from Alvim *et al.* (2010), who reported MSV could store and release photoassimilates to grains, so increasing to their yield. Mass of one thousand grains (M1000) and total dry matter mass (MST) showed a positive and significant correlation with yield, since corn production components are the number of ears, number of rows and number of grains per row (VIAN *et al.*, 2016).

O acúmulo total de Zn nas plantas de milho foi de 606 g ha⁻¹, inferior ao encontrado por Borges *et al.* (2009), para o híbrido GNZ2004, que obteve 2.630 g ha⁻¹. Por outro lado, Duarte *et al.* (2003) e Faria (2014) encontraram valores médios de 331 e 490 g ha⁻¹, respectivamente, os quais estão mais próximos ao observado neste trabalho. Destaca-se ainda que a exportação média de Zn pelos grãos foi de 66%, um valor próximo ao encontrado por Faria (2014) que observou exportação de 71% do Zn total acumulado.

O índice de colheita médio foi de 0,52 (Tabela 3), que é a eficiência da planta em converter fotoassimilados em produção da parte colhida e comercializada (PAULO; ANDRADE, 2003). Silva *et al.* (2006) encontraram o valor médio de 0,49. Esses valores encontram-se dentro da faixa relatada por Setiyono *et al.* (2010), os quais, com um experimento ao longo de vários anos e em diferentes locais de coleta, avaliaram que no milho há variação do índice de colheita de 0,17 a 0,62, apresentando média de 0,50.

A massa de matéria seca vegetativa (MSV) e a produtividade (PRO) não apresentaram correlação significativa a 1 e a 5 % de probabilidade (Tabela 4), diferentemente de Alvim *et al.* (2010), que mostraram a influência da MSV para armazenar e liberar os fotoassimilados para os grãos, acrescentando o seu rendimento. A massa de mil grãos (M1000) e a massa de matéria seca total (MST) apresentaram correlação positiva e significativa com a produtividade, uma vez que os componentes de produção do milho são o número de espigas, número de fileiras e número de grãos por fileira (VIAN *et al.*, 2016).

Table 4 - Pearson correlation coefficients for yield (PCY), corn population (CP), number of rows per ear (RE), number of grain per row (GR), number of grains per ear (GE), mass of one thousand grains (M1000), vegetative dry matter (VDM) and total dry matter (TDM)

Tabela 4 - Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PRO), população de plantas de milho (POP), número de fileiras por espiga (FE), número de grão por fileira (GF), número de grãos por espiga (GE), massa de mil grãos (M1000), matéria seca vegetativa (MSV) e matéria seca total (MST)

Variables	PCY	CP	RE	GR	GE	M1000	VDM	TDM
PCY	1	0.0414	-0.192	-0.0109	-0.216	0.68**	0.387	0.822**
CP		1	0.368	-0.743**	-0.328	-0.228	0.175	0.132
RE			1	-0.655**	0.615*	-0.642**	0.224	0.026
GR				1	0.189	0.232	-0.479	-0.302
GE					1	-0.573*	-0.178	-0.235
M1000						1	0.35	0.612*
VDM							1	0.844**
TDM								1

*, ** Significant at the 5 and 1 % levels, respectively, for the Pearson linear correlation coefficient.

*, ** Significativo a 5 e a 1 %, respectivamente, pela correlação linear do coeficiente de Pearson.

There was a positive correlation between productivity and plant population, but it was not significant at the 5% level (Table 4). Farinelli *et al.* (2014) state that increasing population density does not affect grain yield. While the production components, such as grains per row (GR) and number of grains per ear (GE) showed negative correlation with plant density, the number of rows per ear (RE) showed a positive correlation (Table 4).

As the number of plants per linear meter increased, the number of ears grows and, consequently, productivity also. However, while this occurs intra-individual competition also increases, notably for such resources as light, water and nutrients. Under such competition, grains at the end of the ear are aborted and the ears become smaller (FARINELLI *et al.*, 2014).

It is important to emphasize that, even with RE, GR and GE showing negative productivity-linked values, M1000 showed a positive value (Table 4). Thus, it did not refer to losses in yield. The number of RE correlated positively with GE, since the larger the number of rows the greater the number of grains per ear (VIAN *et al.*, 2016). On the other hand, GR number and M1000 correlated negatively, due to reduced translocation of photoassimilates from the corn stalk to the grain.

An increase in competition between plants, reduces both the photoassimilate reserve and the number of grains per row. This supports Silva *et al.* (2014), who reported a decrease of almost 30% in the quantity of grains per row when plant density was increased from 40,000 to 80,000 plants per ha. Such reductions were also found by Kappes *et al.* (2011), due to increased competition between plants for light. For M1000, there was a positive and significant correlation between total dry matter mass (TDM) and dry matter mass (VDM), explained by the TDM being the sum of the dry matter mass of the vegetative part and that of the grains (Table 4).

The correlation coefficients for grains Cu, Mn and Zn productivity and accumulation in were positive and significant (Table 5). There was also a positive and significant correlation between yield and total Cu and Zn extraction. Lana *et al.* (2008) observed higher corn gain productivity of up to 17.5% when fertilized with Cu and Zn.

Em relação à produtividade e à população de plantas, a correlação foi positiva, mas não foi significativa a 5% de probabilidade (Tabela 4). Farinelli *et al.* (2014) afirmam que o aumento da densidade populacional não afeta a produtividade de grãos. Enquanto que os componentes de produção, como grãos por fileira (GF) e número de grãos por espiga (GE) apresentaram correlação negativa com a população de plantas, mas o componente número de fileiras por espiga (FE) apresentou correlação positiva (Tabela 4).

Conforme aumenta-se o número de plantas por metro linear, o número de espigas cresce e, conseqüentemente, a produtividade também, mas com esse acréscimo há também a competição intraespecífica, que com o aumento de plantas por área é maior, principalmente por luz, água e nutrientes. Com essa competição, os grãos na extremidade da espiga são abortados e as espigas ficam menores (FARINELLI *et al.*, 2014).

É importante destacar que, mesmo apresentando valores negativos de FE, GF e GE com a produtividade, a M1000 apresentou valor positivo (Tabela 4), sendo assim, não remeteu a perdas em rendimento. O número de FE correlacionou positivamente com o GE, visto que quanto maior o número de fileiras maior será a quantidade de grãos na espiga (VIAN *et al.*, 2016). Por outro lado, o número de GF e M1000 correlacionaram negativamente dada à menor translocação (diluição) de fotoassimilados do colmo do milho para o grão.

Com o aumento da competição entre plantas, a reserva de fotoassimilados produzidos é menor e o número de grãos por fileira também, corroborando com Silva *et al.* (2014), que verificaram diminuição de quase 30% na quantidade de grãos por fileira quando se aumentou a população de 40.000 para 80.000 plantas. Essa redução foi também encontrada por Kappes *et al.* (2011), devido ao aumento da competição entre plantas por luz. Com relação a M1000, houve correlação positiva e significativa com a massa da matéria seca total (MST) e desta com a massa da matéria seca vegetativa (MSV), explicado por ser a MST a soma da massa da matéria seca da parte vegetativa e da massa da matéria seca dos grãos (Tabela 4).

Os coeficientes de correlação da produtividade e do acúmulo de Cu, Mn e Zn nos grãos foram positivos e significativos (Tabela 5). Houve também correlação positiva e significativa entre a produtividade e a extração total de Cu e Zn. Lana *et al.* (2008) observaram maior produtividade de milho, com ganhos de até 17,5% quando houve adubação com Cu e Zn.

Table 5 - Pearson correlation coefficients of productivity with vegetative growth, grains, total extraction and Cu, Mn, Fe and Zn harvest indexes

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Pearson da produtividade com o acúmulo em parte vegetativa, grãos, extração total e índices de colheita de Cu, Mn, Fe e Zn

Variables	Productivity
Cu accumulated, vegetative part	0,196
Cu accumulated in grains	0,622*
Cu, Total extraction	0,608*
Mn accumulated, vegetative part	-0,015
Mn accumulated in grains	0,703**
Mn, Total extraction	0,339
Fe accumulated, vegetative part	-0,346
Fe accumulated in grains	0,261
Fe, Total extraction	-0,317
Zn accumulated, vegetative part	0,466
Zn accumulated in grains vegetative part	0,646**
Zn, Total extraction	0,625*
Cu, Harvest Index	0,454
Mn, Harvest Index	0,463
Fe, Harvest Index	0,317
Zn, Harvest Index	-0,006

*, ** Significant at the 5 and 1% levels, respectively, for the Pearson linear correlation coefficient.

*, ** Significativo a 5 e a 1%, respectivamente, pela correlação linear do coeficiente de Pearson.

An increased in-grain accumulation of Cu occurred with the increase in plant density (Figure 1A), implying a greater general accumulation in the whole plant. In the vegetative part there was no such increment, with an average of 133.8 g ha⁻¹. For Mn, increase in productivity was not accompanied by increased whole plant or vegetative part accumulation as of, with averages of 578.4 and 441.5 g ha⁻¹, respectively, being obtained (Figure 1B).

Productivity increase did not imply an increase in accumulated Fe, with averages for the whole plant, vegetative part and grains of 9.71, 8.69 and 1.03 kg ha⁻¹, respectively (Figure 1C). There was an increase in Zn accumulation in grains and in the whole plant with increasing productivity, whereas in the vegetative part there was no increase, with a mean of 208.3 g ha⁻¹ (Figure 1D).

Com o aumento da produtividade houve maior acúmulo de Cu nos grãos (Figura 1A), implicando maior acúmulo também na planta inteira; na parte vegetativa não houve esse incremento, apresentando a média de 133,8 g ha⁻¹. Com relação ao Mn, não houve maior acúmulo na planta inteira e na parte vegetativa com o aumento da produtividade, mostrando médias de 578,4 e 441,5 g ha⁻¹, respectivamente, (Figura 1B).

O aumento da produtividade não implicou aumento do Fe acumulado, sendo as médias na planta inteira, parte vegetativa e grãos de 9,71, 8,69 e 1,03 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 1C). Houve aumento do acúmulo de Zn nos grãos e na planta inteira com o aumento da produtividade, enquanto que na parte vegetativa não houve esse aumento, apresentando média de 208,3 g ha⁻¹ (Figura 1D).

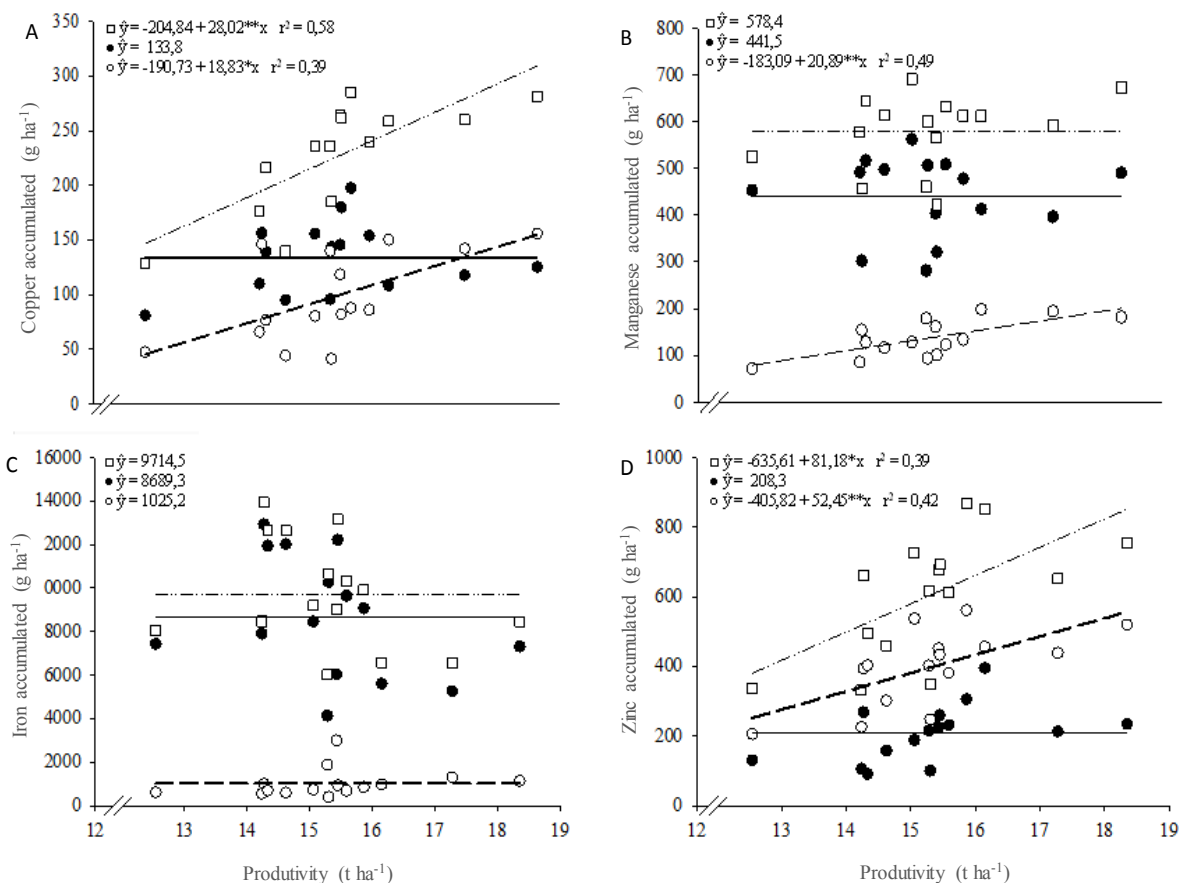


Figure 1 - Copper (A), manganese (B), iron (C) and zinc (D) accumulated in the vegetative part (●), grains (○) and in the whole plant (□) as a function of corn productivity.

Figura 1 - Cobre (A), manganês (B), ferro (C) e zinco (D) acumulados na parte vegetativa (●), grãos (○) e na planta inteira (□) em função da produtividade do milho.

CONCLUSIONS

The uptake and export of Cu and Zn increased linearly with increased productivity;

Micronutrients accumulation in high yield maize is, in decreasing order, for the vegetative part: Fe > Mn > Zn > Cu and, for both grains and whole plant: Fe > Zn > Mn > Cu;

Zn is the micronutrient with the highest harvest index.

CONCLUSÕES

A absorção e exportação de Cu e Zn aumentam linearmente com o aumento da produtividade;

O acúmulo de micronutrientes em milho de alta produtividade é, em ordem decrescente, na parte vegetativa: Fe > Mn > Zn > Cu e, tanto nos grãos quanto na planta inteira: Fe > Zn > Mn > Cu;

O Zn é o micronutriente com maior índice de colheita.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; RUFFO, M. L.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 161-170, 2013. DOI:10.2134/agronj2012.0352.
- BORGES, I. D.; VON PINHO, R. G.; PEREIRA, J. L. A. R. Micronutrient accumulation at different maize development stages. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p. 1018-1025, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000400011>.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento safra brasileira de grãos. Décimo segundo levantamento Safra 2017/18, v. 12, p. 1-148, 2018. ISSN 2318-6852.
- DUARTE, A. P.; KIEHL, J. C.; CAMARGO, M. A. F.; RECO, P. C. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho originárias de clima tropical e introduzidas de clima temperado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 3, p. 1-20, 2003. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v2n03p%25p>.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. 2013. 353p.
- FARIA, M. V. **Proteção e nutrição foliar na produção de massa seca, acúmulo, extração e exportação de macro e micronutrientes em híbridos de milho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, 2014, 84 p.
- GOTT, R. M.; AQUINO, L. A.; CARVALHO, A. M. X.; SANTOS, L. P. D.; NUNES, P. H. M. P.; COELHO, B. S. Índices diagnósticos para interpretação de análise foliar do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 11, p. 1110-1115, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1110-1115>.
- HAFERKAMP, I.; LINKA, N. Functional expression and characterisation of membrane transport proteins. **Plant Biology**, v. 14, n. 5, p. 675-90, 2012. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2012.00591.x.
- LANA, R. M. Q.; FARIA, M. V.; LANA, A. M. Q.; BONOTTO, I.; PEREIRA, D. M. Aplicação de fertilizantes com inibidor de nitrificação e micronutrientes, na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 7, n. 2, p. 141-151, 2008. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v7n02p%25p>.
- PAULO, E. M.; ANDRADE, J. A. da C. Comportamento de um milho híbrido hiperprecoce em dois espaçamentos e diferentes populações de plantas. **Cultura Agrônômica**, v. 12, n. 1, p. 77-88, 2003.
- PINTO, E.; FERREIRA, I. M. P. L. V. O. Cation transporters/channels in plants: Tools for nutrient biofortification. **Journal of Plant Physiology**, v. 179, n. 1, p. 64-82, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.02.010>.
- 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**, v. 32, n. 4, p. 1661-1674, 2008.
- SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.
- SCHMIDT, F.; FORTES, M. A.; WESZ, J.; BUSS, G. L.; SOUSA, R. O. Impacto do manejo da água na toxidez por ferro no arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1226-1235, 2013.
- SCHMIDT, F.; SOUSA, R. O.; FORTES, M. A.; WOLTER, R. C. D.; WESZ, J. Resíduos de azevém na superfície de um planossolo alagado e seus efeitos na concentração de nutrientes na solução do solo e em plantas de arroz. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 2080-2086, 2009.
- SETIYONO, T. D.; WALTERS, D. T.; CASSMAN, K. G.; WITT, C.; DOBERMANN, A. Estimating maize nutrient uptake requirements. **Field Crops Research**, v. 118, n. 2, p. 158-168, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.006>.
- SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; GUIMARÃES, G. L.; BUZETTI, S. Acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura e no milho cultivado em sucessão sob diferentes doses de nitrogênio em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n. 2, p. 202-217, 2006. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v5n02p%25p>.
- USDA – United States Departamento of Agriculture. World agricultural supply and demand estimates, 2018. Disponível em: <<https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/c534fn92g/6q182n624/v405sd06x/htrcp-04-12-2018.pdf>>. Último acesso: 20 de janeiro de 2019.

VALADARES, R. V.; VALADARES, S. V.; FERNANDES, L. A.; SAMPAIO, R. A. Teores de nutrientes no solo e nutrição mineral do milho em áreas irrigadas com água calcária. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 169-176, 2014.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M.; FILHO, M.C.M.T. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 2, p. 254-263, 2011. DOI: 10.5216/pat.v41i2.8390.

VIAN, A. L.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M.; BREDEMEIER, C. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**, vol. 46, n. 3, p. 464 – 471, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150539>.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I.D.; PEREIRA, J.L.A.R.; REIS, M.C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 2, p. 157-173, 2009.