

LETÍCIA BORGES DE BESSA

**TEORES DE Zn E Fe EM TRIGO CULTIVADO NO ALTO PARANAÍBA, MG E
POTENCIAL DE BIOFORTIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Junia Maria Clemente

Coorientadores: Bruno Teixeira Ribeiro
Luiz Roberto G. Guilherme

**RIO PARANAÍBA - MINAS GERAIS
2023**

T

B557t
2023

Bessa, Leticia Borges de, 1997-

Teores de Zn e Fe em trigo cultivado no alto Paranaíba, MG e potencial de biofortificação / Leticia Borges de Bessa. - Rio Paranaíba, MG, 2023.

43 f.: il. (algumas color.).

Orientador: OUTROS

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Agronomia, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvcrp.2023.006>

1. trigo; 2. biofortificação; 3. espectometria; I. II. Universidade Federal de Viçosa.. Agronomia. Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) III. Título

633.11

Bibliotecário(a) responsável: ANA PAULA DE SOUZA CRB-6/2922

LETÍCIA BORGES DE BESSA

**TEORES DE Zn E Fe EM TRIGO CULTIVADO NO ALTO PARANAÍBA, MG E
POTENCIAL DE BIOFORTIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15/06/2023

Assentimento:

Letícia Borges de Bessa
Autor

Junia Maria Clemente
Orientadora

À Deus.

Aos meus pais Sandra e José dos Reis.

Ao meu irmão José Gabriel.

Ao meu namorado Murilo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus por ter me guiado até aqui.

Aos meus pais e meu irmão que nunca deixaram de me acreditar em mim.

Ao meu querido namorado por ter acreditado, incentivado e compartilhado cada instante dessa etapa. Obrigada por tanto amor, paciência e companheirismo.

Aos meus colegas de trabalho pela ajuda e aos meus colegas de sala pelo companheirismo.

Aos meus colegas de laboratório pelo companheirismo e ensinamentos.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo, pela parceria e realização de análises fundamentais para o desenvolvimento do meu trabalho.

A minha orientadora Júnia por todo carinho, dedicação e paciência.

Aos meus co-orientadores Bruno e Luiz Roberto pelo apoio, paciência, dedicação e oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Muito obrigada!

RESUMO

BESSA, Letícia Borges, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2023. **Teores de Zn e Fe em trigo cultivado no Alto Paranaíba, MG e potencial de biofortificação.** Orientadora: Júnia Maria Clemente. Co-orientadores: Bruno Teixeira Ribeiro e Luiz Roberto Guimarães Guilherme.

O trigo é considerado um alimento básico, uma vez que é um ingrediente crucial para a produção de alimentos consumidos globalmente pela população humana, inclusive aquela atingida por fome oculta ou submetida a algum grau de insegurança alimentar. Por isso, a agricultura moderna dedica-se à qualidade dos produtos, além de produtividades elevadas e sustentabilidade, a fim de garantir o direito humano a uma alimentação saudável; por esse motivo a biofortificação tem papel tão importante, uma vez que, garante o acesso de alimentos nutritivos às pessoas devido ao seu custo-benefício e alta sustentabilidade. A avaliação da composição química dos alimentos é essencial para determinação da qualidade dos produtos. Comumente, a análise elementar do solo e tecido vegetal tem sido quantificado via plasma acoplado indutivamente (ICP) ou espectroscopia de absorção atômica (AA), contudo a determinação da concentração de nutrientes em alimentos pode ser grandemente favorecida pela utilização de equipamentos portáteis de fluorescência de raios X (pXRF). O levantamento foi realizado em lavouras comerciais de trigo da Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba, localizada no município de Rio Paranaíba, MG. Foram amostradas 28 áreas comerciais cultivadas com as cultivares OR 1403, OR Feroz e BRS 264. Foram tomadas 20 amostras simples de solos nas camadas de 0-20cm e 20-40cm para compor 1 amostra composta em cada área considerada homogênea, cuja amostra foi quarteada posteriormente em 3 subamostras uniformes. Para amostragem dos grãos de trigo, foi tomada uma amostra homogênea referente a cada área, essa amostra simples foi dividida em 2 subamostras, sendo uma para análise do trigo em grão inteiro e outra para análise do grão inteiro moído. Embora nenhuma área de estudo tenha recebido aplicações e/ou adubação a fim de biofortificar os grãos, foi possível detectar grãos com teores de Fe e Zn elevados, devido as altas produtividades que têm sido obtidas através de aplicações de grande quantidade de insumos, especialmente fertilizantes. Quando se trata de métodos de análise de elementos, o pXRF se mostrou sensível para analisar de forma qualitativa a composição elementar majoritária de amostras de trigo, sem necessidade de digestão de amostras, sendo capaz de identificar as amostras de farinha de trigo integral com alto teor com Fe e Zn, podendo substituir a quantificação via espectroscopia de absorção

atômica (AA) quando se trata de análise de grãos de trigo. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de biofortificação de lavouras comerciais.

Palavras-chave: Trigo. Biofortificação. Espectrometria.

ABSTRACT

BESSA, Letícia Borges, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2023. **Zn and Fe percentage in wheat cultivation in Alto Paranaíba, MG and potential of biofortification.** Adviser: Júnia Maria Clemente. Co-advisers: Bruno Teixeira Ribeiro and Luiz Roberto Guimarães Guilherme

The wheat is considered a basic food, because it is a crucial ingredient to the production of globally consumed foods by the whole human population, including those hit by hidden hunger or submitted to some degree of food insecurity. By virtue of that, the modern agriculture dedicates itself to product quality, in addition to high productivity and sustainability, in order to ensure the human right to a healthy diet; because of that, the biofortification is so important, since it ensure the access to nutritious foods to people, as a result of its cost-benefit and high sustainability. The evaluation of the chemical composition of the foods is essential to the determination of the product quality. Commonly, the elementary analysis of the ground and vegetable tissue it has been quantified by Inductively Coupled Plasma (ICP) or atomic absorption spectroscopy (AA), but the determination of the concentration of nutrients in food can be highly supported by the utilization of portable X-ray fluorescence equipments (pXRF). The research was realized in commercial wheat farming of the Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba, localized in the city of Rio Paranaíba, MG. 28 commercial plots that were plated with OR 1403, OR Feroz and BRS 264 were sampled. 20 simple samples from grounds in the layers from 0-20cm and 20-40cm were taken to compose 1 composed sample in each area considered homogeneous, whose samples were divided posteriorly in 3 uniform subsample. To the sampling of the wheat grains, it was taken an homogenous sample relative to each area, that simple sample was divided on 2 subsample, being one for the analysis of the wheat on the whole grain and other to analisys of the milled grain. Although no study area had received applications and/or fertilization with the objective of biofortification of the grains, it was possible to detect grains with high levels of Fe and Zn, due to the high productivity that has been obtained through high quantity of input applications, especially fertilizers. When it's about the element analysis methods, the pXRF has shown to be sensitive to analyze in a qualitative way the majority elemental composition of wheat samples, without the necessity of sample digestion, being capable of identity the samples wheat flour with high levels of Fe and Zn, being able to replace the quantification with spectroscopy of atomic absorption (AA) when it's about wheat grains analysis. This work had as objective evaluate the biofortification potential of commercial farming.

Key-words: Wheat, biofortification, spectrometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Área de amostragem do Lote 55, assinalando às divisões utilizadas nas amostragens.	27
Figura 2. Área de amostragem do Lote 70, assinalando às divisões utilizada nas amostragens.	27
Figura 3. Área de amostragem do Lote 78, assinalando às divisões utilizada nas amostragens.	28
Figura 4. Teores médios de Fe e Zn determinados pelo ICP e pXRF.	39
Figura 5. Diagrama de dispersão (a) e contribuição das variáveis e (b) em relação aos componentes principais relacionados ao manejo de diferentes áreas de trigo no Alto Paranaíba, MG.	40
Figura 6. Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson, levando em consideração dados de manejo entre as variáveis que compõem o grupo de metodologias de análise. No eixo vertical da direita, as tonalidades das cores, as estimativas de correlação e a significância são representadas pelo teste t, significativo a 5% (*), a 1% (**) e a 0,1% (***). Na diagonal inferior e no eixo horizontal superior estão representadas as metodologias de análises.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Identificação das áreas amostradas, culturas antecessoras e material genético utilizado.....	30
Tabela 2 - Teores de nutrientes disponíveis no solo.....	33
Tabela 3 - Análise química dos grãos de trigo via plasma acoplado indutivamente (ICP).....	35
Tabela 4 - Análise química dos grãos de trigo via equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF).....	36
Tabela 5 – Correlação entre os teores de nutrientes nos grãos de trigo.....	38

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	14
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Biofortificação agronômica com Fe e Zn	15
2.2 Dinâmica de Zn no solo e planta	16
2.3 Dinâmica de Fe no solo e planta.....	17
2.4 Trigo: importância, composição e qualidade.....	18
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 Objetivo Geral:	20
3.2 Objetivos Específicos:	20
4. REFERÊNCIAS	21
SEGUNDA PARTE - O ARTIGO	25
1. Introdução.....	26
2. Materiais e métodos.....	27
2.1 Descrição das áreas em estudo	27
2.2 Análise estatística	31
3. Resultados e Discussão.....	31
3.1 Caracterização do estado nutricional dos grãos e a biofortificação.....	35
3.2 Avaliação dos teores de nutrientes pelo ICP e pXRF.....	41
4. Conclusão	42
5. Referências	43

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se consolidado a tendência de insegurança alimentar grave em escala global, com impacto sobre aproximadamente 2,3 bilhões de pessoas em 2021 (FAO, 2022). Em 2022, estima-se que a insegurança alimentar grave impactou aproximadamente 11,7% da população humana global. Os valores observados em 2021 representam incremento no total de indivíduos afetados em torno de 207 e 73,6 milhões em relação ao total observado em 2019 e 2020, respectivamente. Neste contexto, as deficiências de Fe, Zn e vitamina A estão entre as mais preocupantes e podem causar sérios distúrbios no crescimento e desenvolvimento humano, além de morte em casos severos. Portanto, tais deficiências já são consideradas um sério problema de saúde pública (LONG et al., 2004; WHITE e BROADLEY, 2005; WELCH e GRAHAM, 2004). No caso do Brasil, o país ainda não dispõe de estudos nacionais e não se conhece a real magnitude dessa deficiência. Entretanto, alguns estudos mostram incidência relevante e frequente de deficiência de Fe e Zn em crianças, o que pode caracterizar um problema de saúde pública (PEDRAZA, 2015).

A biofortificação de alimentos foi desenvolvida para elevar a concentração de vitaminas e minerais nas culturas agrícolas, seja através do melhoramento genético ou manejo agrônomico com objetivo de reduzir o problema da deficiência silenciosa de um ou mais micronutrientes (vitaminas e minerais) no organismo ou desnutrição humana.

Cerca de 10% das proteínas e algumas enzimas do corpo humano são dependentes de Zn, uma vez que desempenham várias funções no desenvolvimento neurocomportamental e imunocompetência, bem como funções estruturais e regulatórias (ANDREINI et al., 2006; KREZEL e MARET, 2016). Por outro lado, o Fe tem papel importante no transporte de oxigênio e a baixa disponibilidade deste micronutriente na dieta humana é frequentemente associada a quadros de anemia. Em termo geral, cerca de 50% do total de casos de deficiência mineral em humanos é devido à deficiência de Fe (PNDS-2006, 2008). Dentre os fatores que mais contribuem para agravar a desnutrição humana em Fe e Zn, pode-se destacar o cultivo agrícola em solos com disponibilidade insuficiente destes nutrientes (BOUIS, 2003). Além disso, ambos os elementos têm baixa mobilidade no floema das plantas e, portanto, seu transporte para os órgãos de interesse alimentar e nutricional é comprometido (MARSCNH CER, 2011). Logo, a biofortificação de produtos agrícolas, com enfoque no

manejo da adubação com Fe e Zn, bem como o melhoramento genético podem ser práticas viáveis para reduzir a desnutrição humana.

Regionalmente, solos do Cerrado brasileiro outrora considerados ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, passaram por significativa melhora nos indicadores de fertilidade ao longo das últimas 4 ou 5 décadas. Tal transição é evidente para os solos da região do Alto Paranaíba em Minas Gerais, que apesar de não serem naturalmente férteis, são atualmente caracterizados pela obtenção de altas produtividades em função do uso intensivo de novas tecnologias. Estas tecnologias incluem a aplicação de grande quantidade de insumos, especialmente fertilizantes e defensivos para controle de pragas, doenças e plantas daninhas em lavouras diversas.

Dentre as culturas de grande importância nesta região, o trigo tem ganhado destaque no outono/inverno. Contudo, não se sabe se a melhora na disponibilidade de nutrientes nestes solos se reflete no suprimento satisfatório de elementos como Fe e Zn nos grãos colhidos de plantas cultivadas em regiões que adotam manejo intensivo em solos com fertilidade construída. No caso específico da cultura do trigo, a biofortificação dos grãos com micronutrientes tende a ser muito relevante em função do seu papel direto na alimentação humana.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biofortificação agrônômica com Fe e Zn

A biofortificação dos cereais é uma alternativa promissora para complementar o melhoramento genético, normalmente feito com objetivo de aumentar a produtividade de grãos (CAKMAK, 2002; WELCH et al., 2008). Uma vez garantida a oferta de alimentos decorrente do aumento da produtividade, a biofortificação poderia elevar a concentração de nutrientes biodisponíveis nos órgãos comestíveis das plantas (PALMGREN et al., 2008). Para que isso ocorra, a biofortificação pode ser realizada por meio do próprio melhoramento genético específico para a obtenção de plantas capazes de extrair maiores quantidades de um ou mais nutrientes do solo. Por exemplo, as linhagens de feijão Cranberry, DFA 39-18 e DFA 01-18, cultivadas no Brasil, possuem alto enriquecimento com Fe ($\geq 95,00 \text{ mg kg}^{-1}$ de matéria seca), ou seja, possuem qualidade tecnológica alta e são biofortificadas (RIBEIRO et al., 2020).

Mesquita (2007) ao examinar a composição química das linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), verificou diferentes teores de Fe para o feijão preto ($73,83 \text{ mg kg}^{-1}$, $75,30 \text{ mg kg}^{-1}$ e $83,07 \text{ mg kg}^{-1}$), já para o feijão catador, o teor de Fe encontrado foi de $71,37 \text{ mg kg}^{-1}$.

Diferentes genótipos de plantas também podem exibir resposta distintas a tratamentos com objetivo de obtenção alimentos biofortificados. Ao realizar experimentação com objetivo de biofortificar plantas de alface com Zn, De Moraes (2020) utilizou duas cultivares e observou comportamento distinto entre elas. O autor observou que a alface pode ser biofortificada aplicando-se 40 mg de Zn dm^{-3} , em ambas as épocas de cultivo, sendo a época 1 de março a abril de 2018 e maio a julho de 2018, época 2. Para a cultivar Vanda, e 35 e 12 mg Zn dm^{-3} quando cultivada de março a abril e de maio a julho para a cultivar Saladela.

Dado que programas de melhoramento genético tendem a ter longa duração, técnicas agrônomicas têm sido predominantes nos projetos de pesquisa que visam a obtenção de alimentos biofortificados. A biofortificação agrônômica pode ser obtida por meio de adubação via solo, aplicação foliar, adubação via solo e foliar combinadas, bem como pelo tratamento de sementes (MORAES et al., 2012). Alguns exemplos de biofortificação agrônômica disponíveis na literatura são destacados a seguir, por exemplo, a biofortificação agrônômica de grãos de trigo foi capaz de elevar o teor de Zn no grão para 22 mg kg^{-1} (via aplicação foliar) e 58 mg kg^{-1} (via aplicação no solo e foliar), o teor médio de Zn em grãos de trigo não biofortificado no mesmo experimento foi de aproximadamente 7 e 14 mg kg^{-1} (via aplicação no solo) (CAKMAK, 2010). Gogos et al. (2013) elevou o teor de Zn do grão para 54,1 mg kg^{-1} , enquanto no tratamento controle o teor de Zn no grão foi de 37,7 e 45,5 mg kg^{-1} via fertilização mineral.

2.2 Dinâmica de Zn no solo e planta

O Zn é essencial às plantas pois é ativador enzimático, é componente funcional e estrutural de um grande grupo de enzimas e proteínas. Além disso, atua na síntese do aminoácido triptofano que é precursor do AIA - ácido indol acético. Portanto, plantas que apresentam deficiência de Zn têm tamanho reduzido, internódios curtos, folhas lanceoladas, pequenas e malformadas, clorose internerval (Zn na formação de clorofila), diminuição da qualidade nutricional dos grãos e a produtividade, compromete a resistência a doenças, reduz a síntese proteica (devido a relação com a atividade da RNAase), além de necrose no meristema apical da raiz (CHANEY, 1993, LI et al., 2002; MARENCO e LOPES 2009, BROADLEY et al., 2007). O Zn é classificado como metal pesado, o qual é liberado da rocha matriz a partir do intemperismo químico e/ou físico, e pode ocorrer no solo principalmente nas formas iônica ou complexado com ligantes orgânicos. O Zn^{2+} é a forma absorvida pelas plantas e é transportado até à superfície das raízes por meio de difusão e fluxo de massa. Em solos mais intemperizados, o transporte por difusão tende a ser predominante em função da frequente adsorção de Zn por óxidos e hidróxidos de Fe e Al.

A presença de ânions ou aumento do pH podem diminuir sua disponibilidade pois acarretam a precipitação do elemento (SANTOS 2005, BROADLEY 2007, RENGEL, 2015). Outros fatores característicos do solo também afetam a disponibilidade do elemento, como: teor de matéria orgânica, temperatura, umidade, granulometria, teor total do nutriente e suas propriedades químicas e físicas, além de ser afetado pela localização e distribuição de raízes no perfil do solo e os adubos utilizados no manejo (tipos e modo de aplicação, íons que acompanham o Zn e possíveis contaminantes) (HAN et al., 2011; SADEGHZADEH, 2013).

A disponibilidade de Zn pode ser impactada por diversos fatores. Dentre os quais, a prática de aplicação de calcário em solos de cultivo agrícola proporciona elevação do pH da solução do solo e o uso excessivo de corretivos pode levar à redução da disponibilidade de Zn para as plantas. Em solos com pH acima de 6,5 (pH em H₂O), as plantas têm sua taxa de absorção reduzida (RENGEL, 2015). Em áreas manejadas intensivamente a remoção do nutriente por meio de colheitas sucessivas sem a devida reposição pode limitar a produtividade das culturas ao longo do tempo e conseqüentemente comprometer o transporte para os grãos (CHAVES, DE SOUZA e TITO, 2008; BORTOLON e GIANELLO, 2009). A redução da qualidade nutricional dos grãos pode acarretar sérios distúrbios ao metabolismo vegetal e conseqüentemente proporcionar problemas de saúde aos seres humanos, especialmente nos países em que os cereais são a principal fonte calórica (KALAYCI et al., 1999; GRAHAM e WELCH, 1996).

Em geral, para as pesquisas sobre biofortificação são utilizadas fontes mais solúveis de Zn. Dentre as fontes que podem ser utilizadas na agricultura as mais relevantes são os carbonatos, cloretos, óxidos e os quelatos (TEIXEIRA et al., 2008), os oxissulfatos (OLIVEIRA et al., 2003), sulfato de zinco (TEIXEIRA et al., 2008; MUNER et al., 2011), fertilizantes líquidos (INOCENCIO et al., 2012), entre outras fontes. No Brasil, mesmo com a existência de muitas fontes, devido a sua alta solubilidade e baixo preço, o sulfato de zinco é amplamente utilizado (CAKMAK, 2008). As fontes de zinco podem ser aplicadas via solo, folhas (YILMAZ et al., 1997) e nas sementes (INOCENCIO et al., 2012). Ferraz et al., (2010) concluiu que, o Zn aplicado junto ao adubo NPK + adubação corretiva promoveu o maior teor de Zn na média das profundidades do solo avaliadas, na camada de 0-20cm do solo.

2.3 Dinâmica de Fe no solo e planta

O Fe, assim como o Zn, também é classificado como micronutriente essencial ao metabolismo das plantas, pois está envolvido na respiração, balanço hormonal e fotossíntese, que são suas principais funções fisiológicas na planta (MALAVOLTA, 2006). O Fe atua na

formação das enzimas peroxidase, catalase, xantina oxidase e citocromo oxidase, é insubstituível nos processos de fotossíntese, fixação de N_2 e respiração (GUERINOT e YI 1994, MARENCO E LOPES, 2009), além de desempenhar papel importante na transformação de energia e transferência de elétrons (TAIZ; ZEIGER, 2004). Em solos ácidos ocorre aumento na disponibilidade de Fe^{2+} , uma vez que a redução do Fe é dependente do pH (CAMARGO e FREITAS 1985, SOUZA et al., 2010).

As plantas podem absorver o Fe da solução do solo segundo duas estratégias principais. A estratégia I, típica de dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramináceas e a estratégia II, típica de gramíneas. A estratégia I é caracterizada pela redução do Fe^{3+} a Fe^{2+} por meio da acidificação da rizosfera, promovida pela proteína ferro quelato redutase (HELL, STEPHAN, 2003). Na estratégia II, os compostos fitossideróforos excretados pelas raízes se ligam ao Fe, resultando num complexo quelato (Fe^{3+} -FS) que é transportado para dentro das células através do YS (Yellow Stripe) (BRIAT; CURIE; GAYMARD, 2007).

De modo geral, a deficiência de Fe se manifesta inicialmente em folhas jovens, as quais mostram clorose generalizada enquanto as nervuras se mantêm verdes escuras, na forma de um reticulado fino (MATTOS JUNIOR; BAAGLIA; QUAGGIO, 2005). Além disso, plantas com deficiência severa de Fe apresentam coloração amarelo-palha, com pouca ou nenhuma nervura verde e presença de queimaduras nas extremidades das folhas (ROMHELD, 2001). As fontes disponíveis no mercado para o fornecimento de Fe na adubação das culturas são poucas, com destaque para o Fe-EDTA.

2.4 Trigo: importância, composição e qualidade

O grão de trigo (*Triticum aestivum*) é a matéria-prima para produção da farinha de trigo, que é extensivamente utilizada na indústria alimentícia como ingrediente fundamental para a produção de biscoitos, bolos, macarrão e pães consumidos globalmente. Assim, o trigo possui papel econômico e nutricional significativo para a população (COSTA et al., 2008). O grão de trigo para a alimentação humana pode ser avaliado em termos do germe, endosperma e farelo (Figura 1).

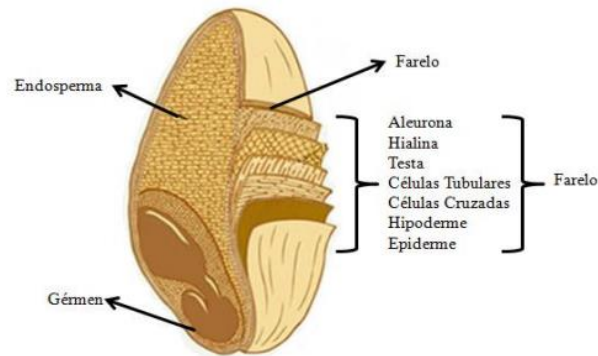


Figura 1. Secção longitudinal e transversal do grão de trigo.
Fonte: Adaptado de Germani (2008).

O germe de trigo é constituído pelo eixo embrionário e escutelo que representam cerca de 2 a 3 % da massa do grão. O germe é rico em vitamina E, antioxidantes e outros componentes lipossolúveis, benéficos aos seres humanos, pois armazena os nutrientes necessários para originar uma nova planta. No entanto, o germe costuma ser removido antes do processo de moagem da farinha branca, uma vez que os lipídios que o constituí limitam a conservação da farinha (GWIRTZ; WILLYARD; MCFALL, 2006; JONES; ENGLESSION, 2010). O endosperma é fonte de carboidratos e fornece energia para o desenvolvimento da plântula durante a germinação. No grão, o farelo é responsável pela proteção física contra invasores. O farelo representa cerca de 17% da massa total do grão, caracterizado pelo pericarpo e a camada de aleurona que envolvem o endosperma, na forma de uma capa protetora. Botanicamente, a aleurona é a camada mais externa do endosperma, no entanto, do ponto de vista tecnológico, ela faz parte do farelo no processo de moagem (GERMANI, 2008). O farelo é o principal componente fibroso dos grãos e possui alto teor de lipídios (SOLAH; FENTON; CROSBIE, 2015; GRUNDAS; WRIGLEY, 2016).

Para o organismo humano, além de ser fonte de amido (60 % a 70 % no grão integral e 65 % a 75 % na farinha branca), o farelo é também fonte de aminoácidos essenciais, fitoquímicos, componentes de fibra dietética, proteínas, minerais e vitaminas, no entanto quando processado é pobre em micronutrientes (ANDERSON, 2004; JONES; ENGLESSION, 2010; SHEWRY, 2009). Para obtenção da farinha é necessário realizar a moagem do trigo, a qual pode ser descrita em duas etapas. Na primeira ocorre a separação do germe, endosperma e o farelo. Na segunda, acontece a moagem do endosperma para produção da farinha em partículas reduzidas (MANDARINO, 1994). A farinha de trigo é composta por cerca de 70 a 75% de amido, 8% a 16% de proteínas, 12% a 14% de água, 2 % a 3 % de fibras, 2% de lipídios e 1 % de minerais. A composição química do grão de trigo define a qualidade da farinha (SCHEUER et al., 2011).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral:

Estudar sobre a biofortificação em Fe e Zn de lavouras de trigo do Alto Paranaíba (MG).

3.2 Objetivos Específicos:

Avaliar os teores de Fe e Zn no solo e em grãos de lavouras comerciais de trigo.

Correlacionar os teores de Fe e Zn avaliados pelo método da digestão nítrico-perclórica e fluorescência de raios X (pXRF).

Avaliar a possibilidade de uso do pXRF para quantificar os teores de Fe e Zn em lavouras de trigo.

4. REFERÊNCIAS

- ANDREINI, C.; BANCI, L.; ROSATO, A. Zinco através dos três domínios da vida. **Journal of Proteome Research**, v.5, p.3173–3178, 2006.
- ALONSO, F. P.; ARIAS, J. S.; FERNANDEZ, R. O.; FERNANDEZ, P. G., Serrano R. E. Implicações agronômicas do fornecimento de subprodutos de cal e gesso para Palexerults do oeste da Espanha. **Soil Science**, v.171(1), p.65-81, 2006.
- BRAIT, J.; CURIE, C.; GAYMARD, F. Iron utilization and metabolismo in plants. **Current Opinion Plant Biology**, London, v.10, p.276-282, 2007.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil. **Brazilian Journal of Soil Science**, v.33(3), p.647–658, 2009.
- BOURIS, H.; LOW, J.; McEWAN, M. Tanumihardjo S. Biofortification: evidence and lessons learned linking agriculture and nutrition. **Food and Agriculture Organization/World Health Organization** [internet]. 2013 [acesso em 18 de out. de 2021]. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agn/pdf/Biofortification_paper.pdf
- BROADLEY, M. R.; WHITE, P.J.; HAMMOND, J. P.; ZELKO, I. Zinc in plants. **New Phytologist** 173: 677-702, 2007
- CAKMAK, I. **Biofortification of cereals with zinc and iron through fertilization strategy**. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 4:1-6, 2010.
- CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, The Hague, v.302, n. 1-2, p.1-17, Jan. 2008.
- CAKMAK, I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. **Plant Soil**, 247:3-24, 2002.
- CAMARGO, C. E. O.; FREITAS, J. G. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de ferro em solução nutritiva. **Bragantia** 44: 65-75. 1985.
- CHANEY, R. L. Zinc phytotoxicity. In, Robson AD. **Zinc in soils and plants**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 135-150. 1993.
- CHAVES, L. H. G.; DE SOUZA, R. S.; TITO, G. A. Adsorção de zinco em Argissolos do Estado da Paraíba: Efeito do pH. **Revista Ciência Agronômica**, 39(4), 511 –516. 2008.
- COSTA, M. G.; SOUZA, E. L. de, STAMFORD, T. L. M.; ANDRADE, S. A. C. **Qualidade tecnológica de grãos e farinhas de trigo nacionais e importados**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 28, n. 1, p. 220- 225, 2008.
- DE MORAES, C. C. **Biofortificação agronômica com zinco em alface**. Tese (Doutorado em agricultura tropical e subtropical, Área de Concentração em Tecnologia da Produção Agrícola) – Instituto agrônomo, Campinas. 2020.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2022. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2022**. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. Rome, FAO. p. 9-52, 2022.

GERMANI, R. Características dos grãos e farinhas de trigo e avaliações de suas qualidades. **Embrapa Agroindústria de Alimentos**, Rio de Janeiro. 56p, 2008.

GOGOS, A.; EVANGELOU, M. W. H.; SCHAFFER, A.; SCHULIN, Schulin R. Lã hidrolisada: um novo solo emenda para biofortificação de trigo com zinco e ferro. **New Zeal J Agric Res**, 2013 56:130–141

GONÇALVES, A. S. F.; GONÇALVEZ, W. M.; SILVA, K. M. J.; OLIVEIRA, R. M. Uso da biofortificação vegetal: uma revisão. **Cerrado Agrociências**. 6:75-87. 2015.

GRAHAM, R. D.; WELCH, R. M. **Breeding for staple-food crops with high micronutrient density**, Working Papers on agricultural Strategies for Micronutrients, n. 3, International Food Policy Institute: Washington DC, 1996.

GRUNDAS, S.; WRIGLEY, C. W. Ultrastructure of the Wheat Grain, Flour, and Dough. *In*: WRIGLEY, C. W. et al. **Encyclopedia of Food Grains**. v. 3, p. 284-295, 2. ed., Oxford: Ed. Elsevier, 2016.

GUERINOT, M. L.; YI, Y. Iron: nutritious, noxious and not readily available. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 104, p. 815-820, 1994.

GWIRTZ, J. A.; WILLYARD, M. R.; McFALL, K.L. Wheat: More Than Just a Plant. *In*: POPPER, L.; SCHÄFER, W. & FREUND, W. **Future of Flour – A Compendium of Flour Improvement**. Kansas City: Agrimedia, 2006.

HAN, X., Li, X., UREN, N., TANG, C. Zinc fractions and availability to soybeans in representative soils of ortheast China. **Journal of soils and sediments**, 11(4), 596-606. 2011.

HELL, R. STEPHAN, U. W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. **Planta**, Berlin, v. 216, p. 541-551, 2003.

HUSSAIN, S.; MUHAMMAD, A. M.; ZED, R.; TARIQ, A. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application. **Plant and Soil** 361: 279–290. 2012.

INOCENCIO, M. F. et al. Soybean response to zinc fertilization in soil with contents above critical level. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.10, p.1550-1554, Out. 2012.

JONES, J. M.; ENGLESSION, J. Whole Grains: Benefits and Challenges. **Annual Reviews Food Science and Technology**, n.1, p. 19-40, 2010.

KALAYCI, M. et al. Rendimento de grãos, eficiência de zinco e concentração de zinco de cultivares de trigo cultivadas em solo calcário deficiente em zinco em campo e casa de vegetação. **Field Crops Research**, v. 63, n. 1, pág. 87-98, 1999.

KREZEL, A.; MARET, W. The biological inorganic chemistry of zinc ions. **Archives of Biochemistry & Biophysics**. 611, 3–19, 2016.

Li, X.; CHEN, B.; FENG, G. Christie P Role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of Zn phytotoxicity and mineral nutrition of host plants. **In 17th WCSS**, Thailand. 2002.

LONG, J. K.; BANZIGER, M.; SMITH, M. E. Diallel analysis of grain iron and zinc density in southern African – adapted maize inbreds. **Crop Science**. 2004; 44:2019-2026.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. **Fisiologia Vegetal**, UFV, p.267-297. 2009.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. p.631

MANDARINO, J. M. G. Componentes do trigo: características físico-químicas, funcionais e tecnológicas. Londrina, PR: **Embrapa Soja - Documentos (INFOTECA-E)**, 1994.

MATTOS JÚNIOR, D.; BAAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A. Nutrição dos citros. In: MATTOS JÚNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônomo, Fundag, p.1-18. 2005.

MESQUITA F. R.; CORRÊA, A. D.; DE ABREU, C. M. P.; LIMA, R. A. Z.; ABREU, A. F. B. Bean (*Phaseolus vulgaris*L.) lines: chemical composition and protein digestibility. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1114-1121, jul./ago., 2007

MINISTÉRIO DA SAÚDE (MS). **PNDS 2006** - Pesquisa Nacional de Demografia e Saúde da Criança e da Mulher. Brasília DF: MS; 2008.

MUNER, L. H. et al., Disponibilidade de zinco para o milho em resposta à localização de fósforo no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.1, p. 29-36, Jan. 2011.

OLIVEIRA, S. C. et al., Resposta de duas cultivares de arroz a doses de zinco aplicado como oxissulfato. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n.3, p.387-396, mar. 2003.

PEDRAZA, D. F.; SALES, M.C. Deficiência de zinco: diagnóstico, estimativas do Brasil e prevenção. **Nutrire**.40(3) p.397-408. 2015

PALMGREN, Michael G. et al. Biofortificação de cereais com zinco: problemas e soluções. **Tendências em ciência vegetal**, v. 13, n. 9, pág. 464-473, 2008.

RENGEL, Z. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 397–409. 2015.

RIBEIRO, N. D.; MEZZOMO, H. C.; KLASENER, G. R. **Novas linhagens de feijão andino biofortificadas para microminerais e de alta qualidade tecnológica**. 7º simpósio de segurança alimentar – Inovação com sustentabilidade. 2020.

ROMHELD, V. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ,

M.C.P.; VAN RAIJ, B.; ABREU, C.A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPQ; FAPESP; POTAFOS, p.71-86. 2001.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 13: 905-927, 2013.

SCHEUER, P. M. et al. Trigo: Características E Utilização Na Panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 2, p. 211–222, 2011.

SANTOS, G. C. G. D. **Comportamento de B, Zn, Mn, e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico**. Tese de Doutorado. Curso de Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, SP. 2005.

SHEWRY, P. R. Wheat. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 6, p. 1537–1553, 2009.

SOLAH, V. A.; FENTON, H. K.; CROSBIE, G. B. Wheat: Grain Structure of Wheat and Wheat-based Products. 1. ed. *In*: CABALLERO, B.; FINGLAS, P.; TOLDRÁ, F. **Encyclopedia of food and health**. p. 470-477. 2015.

SOUZA, L. H. et al. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.34, n. 5, p. 1641-1652, out., 2010.

TAIZ, L. ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, p.719. 2004.

TEIXEIRA, I. R. et al. Fontes e doses de zinco no feijoeiro cultivado em diferentes épocas de semeadura. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.30, n.2, p.255-259, mai, 2008.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science*, v. 10, p. 586–593, 2005.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, p. 353- 364, 2004.

WELCH, R.M. Linkages Between Trace Elements in Food Crops and Human Health. *IN*: Alloway (ed.), *Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production*, 287, **Springer Science + Business Media B.V.** 2008.

YILMAZ, A. et al. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat grown on zinc-deficient calcareous soils in Central Anatolia. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.20, n.4-5, p.461-471, nov. 1997

SEGUNDA PARTE - O ARTIGO

TEORES DE Zn E Fe EM TRIGO CULTIVADO NO ALTO PARANAÍBA, MG E POTENCIAL DE BIOFORTIFICAÇÃO

Resumo

A agricultura moderna tem se dedicado à qualidade dos produtos, além de produtividades elevadas e sustentabilidade, a fim de garantir o direito humano a uma alimentação saudável, especialmente àquela fração da população que está submetida a algum grau de insegurança alimentar. Por esse motivo a biofortificação tem papel tão importante, uma vez que, garante o acesso de alimentos nutritivos às pessoas devido ao seu custo-benefício e alta sustentabilidade. A avaliação da composição química dos alimentos é essencial para determinação da qualidade dos produtos. Comumente, a análise elementar do solo e tecido vegetal tem sido quantificado via plasma acoplado indutivamente (ICP) ou espectroscopia de absorção atômica (AA), contudo a determinação da concentração de nutrientes em alimentos pode ser grandemente favorecida pela utilização de equipamentos portáteis de fluorescência de raios X (pXRF). O levantamento foi realizado em lavouras comerciais de trigo da Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba, localizada no município de Rio Paranaíba, MG. Foram amostradas 28 áreas comerciais cultivadas com as cultivares OR 1403, OR Feroz e BRS 264. Foram tomadas 20 amostras simples de solos nas camadas de 0-20cm e 20-40cm para compor 1 amostra composta em cada área considerada homogênea, cuja amostra foi quarterada posteriormente em 3 subamostras uniformes. Para amostragem dos grãos de trigo, foi tomada uma amostra homogênea referente a cada área, essa amostra simples foi dividida em 2 subamostras, sendo uma para análise do trigo em grão inteiro e outra para análise do grão inteiro moído. Embora nenhuma área de estudo tenha recebido aplicações e/ou adubação a fim de biofortificar os grãos, foi possível detectar grãos com teores de Fe e Zn elevados, devido as altas produtividades que têm sido obtidas através de aplicações de grande quantidade de insumos, especialmente fertilizantes. Quando se trata de métodos de análise de elementos, o pXRF se mostrou sensível para analisar de forma qualitativa a composição elementar majoritária de amostras de trigo, sem necessidade de digestão de amostras, sendo capaz de identificar as amostras de farinha de trigo integral com alto teor com Fe e Zn, podendo substituir a quantificação via espectroscopia de absorção atômica (AA) quando se trata de análise de grãos de trigo. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de biofortificação de lavouras comerciais.

Palavras-chave: Trigo, biofortificação, pXRF.

1. Introdução

Globalmente, a prevalência de insegurança alimentar grave tem aumentado nos últimos anos e os dados disponíveis do ano de 2021 indicam que 11,7% da população humana foi afetada por insegurança alimentar grave. Este percentual representa aproximadamente 73,6 milhões de pessoas a mais que o observado em 2020 e 207 milhões a mais em relação a 2019 (FAO et al., 2022). Dentre as possibilidades de redução da insegurança alimentar, suplementos minerais e vitamínicos podem ser fornecidos além dos suplementos nutricionais pós-colheita. Por exemplo, a fortificação de farinhas de trigo e milho com Fe e ácido fólico é obrigatória no Brasil, embora ainda existam limitações na suplementação dietética. Consequentemente, a fortificação de alimentos básicos como o trigo pode ter impacto positivo na saúde humana. Por se tratar de uma cultura básica, o trigo, por meio de seus derivados, é uma forma alternativa para reduzir o índice de “fome oculta” por meio da biofortificação agrônômica com Zn, uma vez que essa estratégia funciona como uma abordagem rápida, relevante e prática para a fortificação de grãos. (CAKMAK, 2012). Nesse contexto, estabelecer a composição elementar dos alimentos se faz importante para determinação da qualidade dos produtos.

A análise elementar do solo e vegetação normalmente é realizada pela digestão ácida seguida pela quantificação via plasma acoplado indutivamente (ICP) ou espectroscopia de absorção atômica (AA) (McGLADDERY et al., 2018). Tais técnicas são exatas e precisas, embora o tempo necessário para as avaliações sejam longos, dado o grande número de etapas necessárias para o preparo das amostras. Para estes métodos, as amostras vegetais devem ser submetidas à digestão ácida durante o aquecimento, consequentemente produzem resíduos sólidos e/ou efluentes potencialmente tóxicos. Em contrapartida, a determinação da concentração de nutrientes em alimentos pode ser facilitada pela utilização de equipamentos portáteis de fluorescência de raios X (pXRF). Por se tratar de uma técnica versátil, além de relativamente barata e estável, a pXRF pode ser uma alternativa rápida e prática, uma vez que pode ser utilizada tanto no campo quanto no laboratório (DA SILVA, TRIANTAFYLLOU, DELMELLE, 2023).

Sabe-se que na região do Alto Paranaíba/MG, os solos outrora ácidos e de baixa fertilidade natural, foram intensivamente corrigidos e adubados com grande quantidade de insumos para obtenção de altas produtividades. Dentre as culturas de grande importância nessa região, o trigo tem ganhado destaque no outono/inverno. Contudo, não se sabe se os teores de Fe e Zn em grãos de trigo colhidos nestas regiões refletem o *status* da fertilidade construída ao longo do tempo. Investigar a composição nutricional de grãos de trigo é de grande relevância, tanto em termos agrônômicos quanto da perspectiva de saúde pública. O objetivo

do estudo foi avaliar os teores de Zn e Fe no solo e em grãos de trigo em lavouras comerciais com o uso intensivo de fertilizantes e corretivos, bem como comparar estatisticamente as relações entre dados elementares determinados por AA, ICP e aqueles obtidos por pXRF.

2. Materiais e métodos

2.1 Descrição das áreas em estudo

O estudo foi realizado em lavouras comerciais de trigo pertencem a Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba – COOPADAP localizada no município de Rio Paranaíba - MG. Foram amostradas 28 áreas comerciais (Figuras 1, 2 e 3), cultivadas com as cultivares OR 1403, OR Feroz e BRS 264.



Figura 1. Área de amostragem do Lote 55 com as divisões utilizadas nas amostragens.
Fonte: Imagem do autor.



Figura 2. Área de amostragem do Lote 70 com as divisões utilizadas nas amostragens.
Fonte: Imagem do autor.



Figura 3. Área de amostragem do Lote 78 com as divisões utilizadas nas amostragens.
Fonte: Imagem do autor.

Coleta e preparo das amostras de solo

Em cada área foram retiradas aleatoriamente 20 amostras simples nas camadas de 0-20cm e 20-40cm para compor uma amostra composta, a qual foi posteriormente quarteada em 3 subamostras uniformes.

As amostras foram secas em estufa com circulação forçada, à temperatura de 40 °C; peneiradas em peneira com malha de 2 mm e transferidas para o recipiente apropriado, devidamente identificado.

pH em água

Em um frasco de 50 mL foram colocados 10 cm³ de terra fina seca ao ar (TFSA) e adicionaram-se 25,0 mL de H₂O. As amostras foram agitadas com agitador horizontal por 5,0 min a 200 rpm. Antes de mergulhar o eletrodo na suspensão homogeneizada cada amostra foi agitada para proceder com a leitura do pH em potenciômetro devidamente calibrado com soluções-padrão de pH 4,0 e 7,0.

Fósforo

Em erlenmeyer de 125 mL, colocaram-se 5 cm³ de TFSA e adicionaram-se 50 mL de extrator Mehlich⁻¹. As amostras foram agitadas por 5 min em agitador circular horizontal a 200 rpm e deixado em repouso durante 16 h. Em seguida, foram pipetados 5,0 mL do sobrenadante e adicionados 5,0 mL do reagente de trabalho (RT). Após 30 min, foi realizada a leitura em espectrofotômetro de absorção molecular no comprimento de onda de 725 nm.

Potássio

Em erlenmeyer de 125 mL foram colocados 5,0 cm³ de TFSA e adicionaram-se 50 mL do extrator Mehlich⁻¹. As amostras foram agitadas por 5 min em agitador circular horizontal a

200 rpm e deixado em repouso durante 16 h. Em seguida, foram pipetados 10 mL do sobrenadante em um becker e realizada a leitura diretamente no extrato, utilizando um espectrofotômetro de emissão em chama.

Cálcio e magnésio

Em erlenmeyer de 125 mL foram adicionados 10,0 cm³ de TFSA e adicionados 100 mL do extrator KCl 1,0 mol/L. As amostras foram agitadas em agitador circular horizontal a 200 rpm por 5 min e posteriormente repousaram por 16 h. Foi retirada uma alíquota de 0,5 mL e colocada em tubo de ensaio, adicionados 10 mL da solução de SrCl₂ contendo 1.680 mg/L de Sr. O tubo de ensaio foi agitado antes da leitura da amostra em espectrofotômetro de absorção atômica.

Ferro, manganês, zinco e cobre

Em erlenmeyer de 125 mL foram adicionados 5,0 cm³ de TFSA e adicionaram-se 50 mL do extrator Mehlich⁻¹. As amostras foram agitadas por 5 min em agitador circular horizontal a 200 rpm e deixadas em repouso por 16 h. Em seguida, foram pipetados 10 mL do sobrenadante e realizada a leitura diretamente no extrato, utilizando um espectrofotômetro de absorção atômica.

Determinação dos nutrientes via pXRF

As amostras de solo foram submetidas à análise com o equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF), aproximadamente 20g de amostra foram acondicionadas em potes plásticos (porta-amostra) contendo filme Prolene na base. As amostras foram interrogadas por 90s utilizando um equipamento da marca Bruker modelo S1 Titan 800 no modo GeoExploration. Para controle de qualidade da análise foram utilizados os padrões NIST 1547 e NIST 1515.

O equipamento possui as seguintes características: tubo Rh (4 W, 15–50 keV e 5–100 µA), colimador de 8 mm, detector do tipo SDD com janela de grafeno e resolução <145 eV.

Coleta e preparo das amostras de trigo

Em cada área foi retirada uma amostra simples e cada amostra foi quarteada em 2 subamostras, sendo uma para análise do trigo em grão e outra para análise do grão moído.

Todas as amostras dos grãos de trigo foram secas em estufa com ventilação forçada de ar a 70 °C até atingir massa constante. Uma das subamostras teve o seu grão inteiro triturado em

moinho tipo Wiley equipado com peneira de 1,27 mm e transferidas para o recipiente apropriado devidamente identificado. Os teores de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu foram determinados de acordo com o protocolo de Malavolta et al., (1998).

Determinação dos nutrientes via pXRF dos grãos moídos

Os grãos de trigo secos e moídos foram submetidos à análise com o equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF), aproximadamente 20g de amostra foram acondicionados em potes plásticos (porta-amostra) contendo filme Prolene na base. As amostras foram interrogadas por 90s utilizando um equipamento da marca Bruker modelo S1 Titan 800 no modo GeoExploration. Para controle de qualidade da análise foram utilizados os padrões NIST 1547 e NIST 1515.

O equipamento possui as seguintes características: tubo Rh (4 W, 15–50 keV e 5–100 μ A), colimador de 8 mm, detector do tipo SDD com janela de grafeno e resolução <145 eV.

Determinação dos nutrientes via ICP-OES dos grãos inteiros

As amostras de trigo moídas foram submetidas à digestão ácida. Para isso, 0,1 g de amostra de grão moído foi transferido para tubos de Teflon® de 50 mL seguida da adição de 5 mL de de HNO₃ e realizada a digestão em forno micro-ondas seguindo o método USEPA 3051a (USEPA, 2007). Após a digestão, as amostras foram filtradas usando papel de filtro quantitativo e transferido para tubos Falcon® de 50 mL. O volume final foi completado para 50 mL, com água ultrapura e realizada a quantificação de P, K, Ca, Zn, Cu, Fe, Mn. Para controle de qualidade da análise, foi utilizado padrão certificado NIST 1570a. As recuperações (%) para cada um dos elementos foram: P (81,6); K (114,1); Ca (99,9); Zn (90,4); Cu (101,4); Mn (109,1).

Tabela 1- Identificação das áreas amostradas, culturas antecessoras e material genético utilizado

ID	Cultivo	Inverno 2020	Verão 20/21	Inverno 21	Material genético	Declividade
1	Sequeiro	Trigo	Milho	Trigo	OR 1403	1125
2	Sequeiro	Alho	Milho	Trigo	BRS 264	1134
3	Sequeiro	Trigo	Milho	Trigo	OR 1403	1144
4	Sequeiro	Trigo	Milho	Trigo	BRS 264	1144
5	Sequeiro	Cebola	Milho	Trigo	BRS 264	1143
6	Sequeiro	Cenoura	Milho	Trigo	BRS 264	1129
7	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	OR 1403	1162
8	Sequeiro	Cenoura	Soja	Trigo	BRS 264	1165

9	Sequeiro	Cenoura	Soja	Trigo	OR Feroz	1170
10	Sequeiro	Cenoura	Pousio	Trigo	OR 1403	1165
11	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	OR 1403	1173
12	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	OR 1403	1176
13	Sequeiro	Cenoura	Soja	Trigo	OR 1403	1178
14	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	BRS 264	1180
15	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	OR 140	1176
16	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	OR 1403	1173
17	Sequeiro	Pousio	Cenoura	Trigo	BRS 264	1174
18	Sequeiro	Pousio	Cenoura	Trigo	BRS 264	1174
19	Sequeiro	Cenoura	Soja	Trigo	BRS 264	1143
20	Sequeiro	Cenoura	Pousio	Trigo	BRS 264	1142
21	Sequeiro	Girassol	Soja	Trigo	BRS 264	1145
22	Sequeiro	Milho Safrinha	Soja	Trigo	BRS 264	1135
23	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	BRS 264	1121
24	Sequeiro	Abacate	Pousio	Trigo	BRS 264	1130
25	Sequeiro	Pousio	Batata	Trigo	BRS 264	1147
26	Sequeiro	Pousio	Cenoura	Trigo	BRS 264	1146
27	Sequeiro	Pousio	Cenoura	Trigo	BRS 264	1148
28	Sequeiro	Trigo	Soja	Trigo	BRS 264	1148
29	Sequeiro	Café	Soja	Trigo	BRS 264	1115

2.2 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software livre R (R Core Team, 2020). Para fins analíticos utilizou-se da técnica de estatística multivariada. Para verificar a dispersão dos nutrientes e suas associações com material genético, culturas antecessoras, foi realizada uma análise de componentes principais considerando os dois primeiros componentes principais que explicassem pelo menos 60% da variação total dos dados, conforme recomendado por Cruz et al., (2016) e Ferreira (2018). Com o propósito de testar a correlação entre a digestão ácida e o pXRF foram calculadas as estimativas de correlação obtidas pelo método de Pearson, com o teste t para avaliar sua significância ao nível de 0,1% (***), 1% (**) e 5% (*) de probabilidade e para a correlação das características químicas do solo e do grão. Por fim, com o propósito de agrupar os tratamentos com base nas respostas dos diferentes nutrientes estudados no grão utilizou-se o mapa de calor.

3. Resultados e Discussão

Os teores de K, Ca e Mg em todos os talhões na camada de 0-20 cm também são considerados muito altos (Tabela 2). O somatório dos teores de Ca e Mg nos solos de todos os talhões em muito superam a exigência da cultura do trigo de sequeiro ou irrigado que é de 2

cmol_c/dcm³. Quanto aos micronutrientes, a média de todos os talhões são considerados altos na camada de 0-20 cm (Tabela 2 - Ribeiro et al., 1999). Apesar de não serem apresentados os dados a respeito da textura do solo ou do fósforo remanescente, os teores médios de P na camada de 0-20 cm de todos os talhões são considerados bons ou muito bons de acordo com o Manual de Recomendação de Adubação para o estado de Minas Gerais (Ribeiro et al., 1999).

Tabela 2 - Teores de nutrientes disponíveis no solo.

ID	ABSORÇÃO ATOMICA (AA)									pXRF					
	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	pH	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe
	mg/dm ³		cmol/dm ³		mg/dm ³					mg/kg					
	-----0-20cm-----														
1	45,010	650,000	7,035	2,853	8,253	39,990	76,443	18,843	5,977	1429,667	453,333	2797,333	< LOD	262	120508,6
2	126,897	945,000	6,793	2,932	3,353	38,453	35,620	27,087	7,357	1396,667	435	2869,667	< LOD	277,333	119262
3	23,650	726,667	4,293	2,030	3,713	25,070	50,060	13,113	5,427	1273	464,667	2718	< LOD	265,667	119553
4	33,737	1060,0	4,239	1,867	2,677	22,863	42,113	17,447	5,863	1702,333	466,667	3132,667	0,5842	275	116941
5	59,297	446,667	4,624	1,777	5,560	21,420	54,513	17,183	5,577	1534,333	504,333	2926	< LOD	270	116832
6	45,267	538,333	4,606	1,987	3,177	22,560	49,803	20,580	6,017	1521	486,667	2991	< LOD	284,333	117222
7	27,870	826,667	5,353	2,252	1,347	22,587	60,660	15,777	6,107	1549,333	487,333	2222,333	< LOD	286	130272,3
8	77,593	868,333	5,859	2,093	3,133	30,333	47,943	21,737	6,543	1474	435,667	2224,333	< LOD	261,667	129460,6
9	87,233	1100,000	6,143	2,369	4,870	36,507	41,300	25,700	6,530	1163,333	448	2229,667	< LOD	239,667	124574
10	50,930	819,167	5,399	2,314	2,990	29,575	49,292	19,778	6,013	1040	434,167	1970,167	< LOD	238,667	124199,5
11	14,627	538,333	4,655	2,258	1,110	22,643	57,283	13,857	5,497	916,667	420,333	1710,667	< LOD	237,667	123825
12	24,637	885	4,630	1,662	1,950	24,177	59,880	17,237	6,137	886,667	422	1653	< LOD	244,667	124661,6
13	39,643	1271,667	5,817	2,477	2,110	29,427	62,983	17,450	6,440	1228,333	530	2040,333	< LOD	241,667	126400,3
14	32,140	1078,333	5,224	2,070	2,030	26,802	61,432	17,343	6,288	1058	476	1846,667	< LOD	243,167	125531
15	7,437	553,333	4,878	2,470	0,917	21,937	58,830	13,130	6,313	1211	457,333	2042,333	< LOD	253	127440,6
16	11,130	675	5,444	2,174	1,367	19,107	63,090	7,787	6,237	1373	533,667	2281,667	< LOD	249,333	127753
17	103,220	1691,667	6,012	2,325	3,810	30,580	60,217	21,173	6,230	1590,333	412,667	2834	< LOD	301,333	128247,6
18	76,313	755,000	5,636	2,483	3,833	26,973	45,657	21,440	6,487	1314,667	462,667	2609,667	< LOD	249	122788,3
19	82,473	1551,667	5,936	2,537	4,823	28,577	47,280	24,107	6,420	1793,667	527,333	3147,333	< LOD	309,667	130878,6
20	25,333	778,333	25,333	0,971	2,340	22,380	100,490	16,303	5,937	1741,667	516,667	3075,333	< LOD	295,333	130232,6
21	106,593	950,000	6,285	2,474	5,600	30,460	60,737	18,907	6,563	1689,333	526,333	3224,333	< LOD	313,667	131434,6
22	6,333	586,667	6,333	1,397	6,087	20,953	137,533	14,027	5,830	1336	406,667	3026,333	< LOD	296,333	120025,3
23	9,270	723,333	5,900	2,840	1,150	22,200	66,557	11,180	6,100	1718,333	605	3401,667	< LOD	301,333	131087,3
24	80,187	1345,000	5,623	1,504	4,920	34,400	36,667	25,095	6,330	1933,333	627	3440,667	< LOD	285,667	125402,6
25	78,670	1273,333	5,817	1,333	5,117	30,757	39,277	24,969	6,353	1722	615,333	3403,667	< LOD	310	130535,6

26	99,377	1956,667	6,211	1,486	3,827	32,137	44,513	25,279	6,350	1390,667	655,333	2870,333	< LOD	291	131821,3
27	10,733	985,000	4,371	1,804	1,323	24,143	60,093	13,533	6,377	1468,667	486,667	2922,333	< LOD	295,667	132425
28	5,377	683,333	6,841	2,986	13,005	29,195	66,500	18,793	5,900	1699,667	532,333	2869,333	0,4696	315,333	133717
-----20-40cm-----															
29	8,667	151,667	5,437	1,813	2,893	32,163	122,223	14,177	5,927	1533,667	493	2937	< LOD	247	124042,3
30	49,667	386,667	6,343	2,284	2,220	32,653	76,320	21,863	7,250	1462	461	2850,667	< LOD	275	123583,3
31	4,667	260,000	4,018	0,905	1,127	12,497	99,183	4,977	5,607	1645	438,667	2954	< LOD	248	123561,3
32	12,667	303,333	5,218	1,180	1,810	17,500	96,733	11,603	5,857	1616,667	463	3001,667	< LOD	233	124118
33	19,000	223,333	5,207	0,882	2,497	17,037	87,873	13,367	5,763	1227	364	2584,333	< LOD	254	119378
34	24,333	198,333	5,110	1,149	2,417	20,903	86,503	19,347	5,933	1440	438	2650,5	< LOD	253	123999,5
35	7,000	313,333	4,841	0,787	0,857	15,597	93,797	11,013	5,727	868,667	223,333	1807	< LOD	228	82150,33
36	39,667	428,333	6,750	1,295	2,320	27,677	90,743	20,083	6,300	1056,667	388,333	2406	< LOD	323,333	127906
37	45,000	460,000	7,056	1,584	2,803	32,873	84,453	23,183	6,707	575	398	1194,333	< LOD	212,667	93158
38	42,333	444,167	6,903	1,439	2,562	30,275	87,598	21,633	6,503	815,833	393,167	1800,167	< LOD	268	110532
39	21,000	680,000	11,037	2,495	2,540	39,920	263,350	25,220	16,870	3610	1531	6455	< LOD	939	410828
40	8,333	315,000	4,464	0,772	1,797	19,447	101,110	13,775	6,207	1495	474,333	2437,333	< LOD	325,333	135067,3
41	23,333	495,000	6,315	1,594	1,367	27,333	103,507	14,957	6,603	1493,333	483,333	2677	< LOD	330,667	134701,6
42	35,167	506,667	6,557	1,677	2,330	26,182	90,400	18,230	6,497	1323,833	477,833	2301,833	< LOD	334	134755,1
43	47,000	518,333	6,800	1,760	3,293	25,030	77,293	21,503	6,390	1154,333	472,333	1926,667	< LOD	337,333	134808,6
44	7,000	276,667	4,864	0,860	1,300	14,827	96,983	6,470	5,777	1137	540,333	1711	< LOD	301,333	134548,0
45	30,333	473,333	7,134	1,364	2,387	24,593	89,690	16,013	6,073	1319	515	1993	< LOD	309,667	133586,3
46	42,667	275,000	6,401	1,658	2,643	23,723	81,377	19,527	6,110	1040	470	2146,333	< LOD	265,333	131157,6
47	4,000	285,000	4,731	1,217	1,183	16,653	93,483	9,780	6,050	944,667	483	2314,333	< LOD	280,333	131920,6
48	6,333	341,667	3,558	0,598	1,437	12,370	83,797	5,917	5,567	941	504,333	2180,667	< LOD	277,667	131068,6
49	60,333	385,000	7,983	1,705	6,560	26,777	95,417	18,717	6,593	999	472	1812,5	< LOD	235	125014,
50	4,000	348,333	4,020	1,221	4,213	11,793	115,637	7,357	5,480	1349	499	2442	< LOD	260	125717
51	2,667	300,000	4,764	1,223	2,367	10,360	114,237	5,097	5,757	1242	480,333	2472	< LOD	244	119432,3
52	50,000	383,333	8,009	1,709	4,263	31,453	70,063	23,557	6,280	1211,67	411	2424	< LOD	253,667	118967,3
53	47,333	316,667	6,526	1,339	4,557	29,753	78,870	22,590	6,177	1290,333	447	2523	< LOD	258,667	119817
54	45,333	555,000	7,165	1,556	3,417	30,380	80,813	22,957	6,303	1502	418,333	3012	< LOD	241,667	118251
55	6,667	378,333	3,434	0,731	1,367	14,043	84,147	8,200	5,667	1687	405	3894	< LOD	244	109798
56	16,000	370,000	5,613	1,462	8,090	18,303	110,303	12,907	5,623	1222	418,667	2339,667	< LOD	251	117293,6

3.1 Caracterização do estado nutricional dos grãos e a biofortificação

Os resultados obtidos através da técnica de ICP (Tabela 3) indicam que das 27 áreas amostradas, apenas 9 áreas não apresentaram teores elevados de Fe e apenas 2 apresentaram baixos teores de Zn. Sendo elas: as áreas 5, 6, 7 e 8 do lote 78 e as áreas 3, 4, 8, 10 e 11 do lote 70 apresentaram baixo teor de Fe e as áreas 4 e 5 do lote 78 apresentaram baixo teor de Zn. Avaliando as áreas através da técnica do pXRF (tabela 4), 12 das 27 áreas estudadas apresentam teores elevados de Fe e 26 áreas apresentaram teores elevados de Zn. A área 1 do lote 78 apresentou baixo teor de Fe e a área 4 também do lote 78, apresentou baixo teor de Zn.

A linha de base de cada micronutriente foi avaliada para cada cultura e relatados em trigo e milho (25 ppm Zn) (Beebe et al., 2000; Bouis e Saltzman, 2017; Govindaraj et al., 2019; CAST, 2020). Segundo o Grupo Consultivo de Pesquisa Agrícola Internacional (CGIAR), o teor de Fe recomendado para o grão de trigo seco é de 59 ppm (Bouis et al., 2011). Portanto, os resultados de Zn obtidos tanto no pXRF quanto no ICP sugerem que os grãos produzidos nas áreas estudadas podem ser considerados biofortificados, uma vez que, possuem teores de Zn e Fe acima do que foi descrito.

Embora nenhuma área de estudo tenha recebido aplicações e/ou adubação afim de biofortificar os grãos, foi possível detectar grãos com teores de Fe e Zn elevados, provavelmente devido ao uso intensivo de tecnologias e altas produtividades que têm sido obtidas através de aplicações de grande quantidade de insumos, especialmente fertilizantes.

Tabela 3 - Análise química dos grãos de trigo via plasma acoplado indutivamente (ICP)

ID	P	K	Ca	Cu	Mn	Fe	Zn
	dag/kg			mg/kg			
1	0,24	0,39	0,18	14,59	63,47	278,4	86,9
2	0,25	0,34	0,13	7,59	21,55	302,85	37,81
3	0,24	0,44	0,05	7,00	41,92	254,00	50,12
4	0,25	0,29	0,21	5,56	29,67	206,71	38,76
5	0,17	0,31	0,05	39,50	23,21	153,16	36,99
6	0,21	0,31	0,01	3,66	25,61	172,51	38,24
7	0,16	0,30	-	2,84	25,09	79,73	34,80
8	0,24	0,30	0,01	3,36	17,48	223,71	35,90
9	0,27	0,41	0,01	3,44	17,90	74,65	32,34
10	0,20	0,30	-	4,44	17,38	193,26	25,56
11	0,14	0,27	-	1,97	21,23	53,54	25,77
12	0,17	0,31	-	2,62	20,37	50,50	31,73
13	0,16	0,33	-	2,41	17,42	55,40	28,65
14	0,14	0,24	-	2,26	26,92	47,88	34,85
15	0,17	0,34	-	2,77	25,02	68,83	34,87

16	0,17	0,31	0,04	2,69	28,57	165,17	31,49
17	0,20	0,29	0,01	4,16	18,65	80,36	36,36
18	0,20	0,25	0,01	2,90	15,47	125,16	32,35
19	0,15	0,22	-	2,74	13,00	121,91	29,62
20	0,13	0,19	-	1,72	27,87	39,73	33,37
21	0,16	0,22	-	2,36	27,45	46,93	32,93
22	0,17	0,28	-	4,37	35,59	67,78	47,16
23	0,18	0,28	-	3,25	21,59	134,18	35,64
24	0,18	0,27	-	3,33	16,17	64,14	33,28
25	0,22	0,28	-	3,23	10,98	56,93	32,30
26	0,20	0,29	0,01	3,63	14,60	61,76	35,31
27	0,14	0,22	-	1,27	25,45	42,05	30,61
28	0,15	0,23	-	3,07	21,15	56,09	35,54

Tabela 4 - Análise química dos grãos de trigo via equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF)

ID	P	K	Ca	Cu	Mn	Fe	Zn
	dag/kg		mg/kg				
1	1,077	1,653	0,353	10	149	391	37
2	1,095	2,224	-	9	319	450	56
3	0,819	1,496	0,05	9	234	361	50
4	0,384	1,535	-	211	161	134	42
5	0,622	1,447	-	8	182	303	41
6	0,506	1,493	-	11	176	297	46
7	0,838	1,872	-	7	220	23	40
8	0,862	1,609	-	7	127	150	41
9	1,148	2,071	-	7	125	83	33
10	0,967	1,662	-	7	118	468	23
11	0,754	1,877	-	6	191	-	33
12	1,009	2,103	-	6	189	-	41
13	0,793	1,913	-	7	141	-	34
14	0,560	1,306	-	6	204	-	32
15	0,938	2,049	-	7	206	-	40
16	0,730	1,865	-	6	199	447	32
17	0,843	1,482	-	6	150	-	39
18	0,785	1,362	-	8	132	150	44
19	0,599	1,341	-	7	114	326	38
20	0,565	1,340	-	6	255	-	44
21	0,644	1,327	-	6	214	-	38
22	0,559	1,372	-	8	223	-	49
23	0,642	1,424	-	8	162	368	39
24	0,746	1,475	-	7	123	-	35
25	0,811	1,403	-	8	88	-	35

26	0,759	1,536	-	7	112	-	39
27	0,631	1,455	-	3	211	-	37
28	0,586	1,487	-	7	187	-	44

O pH do solo correlacionou-se de forma negativa e significativa apenas com os teores de Mn nos grãos de trigo. Esses mesmos teores de Mn também apresentaram correlação negativa e significativa com os teores de Mn e Zn no solo, corroborando com Camargo et al., (1982) que descreveu um declínio no teor de Cu, Fe, Mn e Zn solúveis em DTPA com o aumento do pH na adição de calcário, nos solos do Estado de São Paulo. No entanto, o contrário foi observado para os teores de Fe. Conforme esperado, os teores de K nos grãos de trigo foram negativamente correlacionados com os de Ca no solo, apesar de os teores de K no solo também apresentarem valores muito altos. O Mn e Zn do solo correlacionaram-se moderadamente com os teores de P nos grãos de trigo (Tabela 5), que é o oposto do que foi relatado por Marschner, (2011), que observou uma correlação negativa entre os elementos embora a interação P-Zn não tenha afetado significativamente a absorção do Zn.

Tabela 5 – Correlação entre as características químicas do solo e dos grãos de trigo avaliados pela digestão ácida

Solo	Grãos - ICP					
	P	K	Cu	Mn	Fe	Zn
pH	0,281	-0,041	-0,294	-0,497*	0,136	-0,306
P	0,468*	0,037	0,106	-0,517	0,205	-0,098
K	0,167	-0,097	-0,259	-0,55	-0,203	-0,216
Ca	-0,288	-0,405*	-0,129	0,081	-0,217	-0,069
Mg	0,085	0,152	-0,094	-0,13	0,277	-0,145
Cu	0,023	-0,181	0,182	-0,1	-0,108	0,228
Mn	0,473*	0,146	-0,15	-0,543*	0,074	-0,13
Fe	-0,495*	-0,29	-0,076	0,491*	-0,347	0,294
Zn	0,464*	-0,0002	-0,005	-0,654*	0,066	-0,12

Na literatura é bastante consistente estudos quanto aos efeitos de pH na disponibilidade de micronutrientes para as plantas (Novais et al., 2007), neste estudo o pH não proporcionou uma interação significativa para Fe e Zn. Além disso está bastante consolidado o efeito de interação entre os nutrientes durante o processo de absorção pelas raízes (Marschner, 2011). Apesar dos tratos culturais intensivos dos solos do Alto Paranaíba, não se observa efeito inibitório na absorção de Fe e Zn pelas plantas de trigo. Cabe ressaltar que de acordo com a Tabela 1, poucas áreas estavam em pousio antes do cultivo de trigo e o cultivo dos solos configura-se como uma forma bastante eficiente para diminuição do pH do solo.

O efeito inibitório de competição pelos sítios de absorção de micronutrientes catiônicos foi observado apenas para o Mn, que apesar de estar em concentrações adequadas no solo aparentemente teve a transferência para os grãos comprometida. Contudo, o Mn é um micronutriente de baixa mobilidade no floema das plantas e devido à baixa transpiração de grãos de trigo pode ter contribuído para menor mobilidade do elemento para os grãos e possivelmente para os pontos de crescimento.

No presente estudo, os valores médios de pH do solo são considerados adequados para a cultura do trigo, no entanto, sabe-se que aplicações excessivas de calcário são feitas nas áreas sem o uso de tabelas oficiais ou balanço nutricional e junto ao efeito competitivo dos demais micronutrientes catiônicos; os manejos juntos contribuem para a competição entre os micronutrientes catiônicos.

Em geral, os teores de P nos grãos apresentaram correlação significativa e positiva com os teores de Fe e Zn. O mesmo comportamento foi observado para o K. Ademais, os teores de Mn e Fe dos grãos de trigo também apresentaram correlação significativa e positiva com os teores de Zn nos grãos (Tabela 6). Estes dados sugerem que a transferência dos nutrientes para os grãos não apresentou efeito de inibição competitiva, contrariando o que foi descrito por Machado (2006), que obteve resultados negativos sobre a interação entre o P e o Zn. Na interação, a adição de P diminuiu a concentração de Zn na parte aérea. Ele et al., (2021) avaliaram a interação de P-Zn na alfafa e observaram correlação negativa pois afetou significativamente a concentração de Zn extraído com DTPA, a massa seca da planta, o acúmulo de Zn e P. Marrocos et al. (2003) observou que teores de Fe presente nas folhas de macadâmia tiveram aumento conforme a elevação da concentração de Fe na solução nutritiva, e em contrapartida, não foi afetada pela concentração de P na solução nutritiva. Ao incrementar as concentrações de Fe na solução nutritiva, houve redução dos teores de P nas folhas das plantas de macadâmia.

Tabela 5 – Correlação entre os teores de nutrientes nos grãos de trigo

	P	K	Cu	Mn	Fe	Zn
P	1	0,661*	0,053	-0,018	0,639*	0,421*
K		1	0,184	0,257	0,466*	0,427*
Cu			1	0,087	0,272	0,228
Mn				1	0,284	0,68*
Fe					1	0,495*
Zn						1

Conforme exemplificado na Figura 4, a cultivar BRS 264 apresentou maior potencial de acúmulo de nutrientes, corroborando com os resultados obtidos por Rozeira (2020), uma vez que os teores de Zn nos grãos variaram entre 55 mg kg⁻¹ (MGS Brillhante) a 73 mg kg⁻¹ (BRS 264), e no farelo, variaram de 117 mg kg⁻¹ (MGS Brillhante) a 163 mg kg⁻¹ (BRS 264). Ao avaliarem a estabilidade das concentrações de alguns minerais e a variabilidade genética em grãos de trigo de pão, Oury et al., (2006) obtiveram teores de Zn variando entre 15 mg kg⁻¹ e 35 mg kg⁻¹, que são valores inferiores aos obtidos no presente estudo.

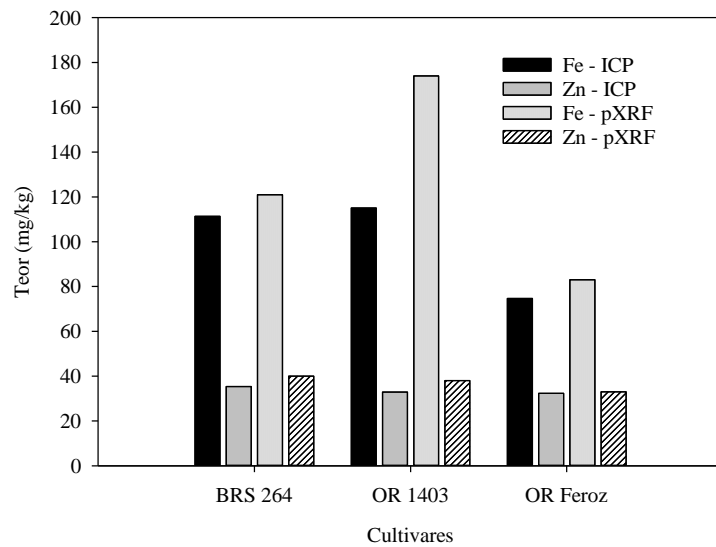


Figura 4. Teores médios de Fe e Zn determinados pelo ICP e pXRF.

Na Figura 5, encontra-se disposta a dispersão gráfica oriunda dos dois primeiros componentes principais, bem como a contribuição de cada nutriente para a formação deste componente. Por uma análise preliminar percebe-se que os dois primeiros componentes principais foram capazes de explicar 61,5% da variação total dos dados. Conforme descrito por Cruz et al. (2015) e Ferreira (2018), quando os dois primeiros componentes principais são capazes de apresentar explicação igual ou superior a 60% da variação total dos dados, podemos afirmar que a distância entre os diferentes tratamentos equivale ao grau de dissimilaridade entre eles.

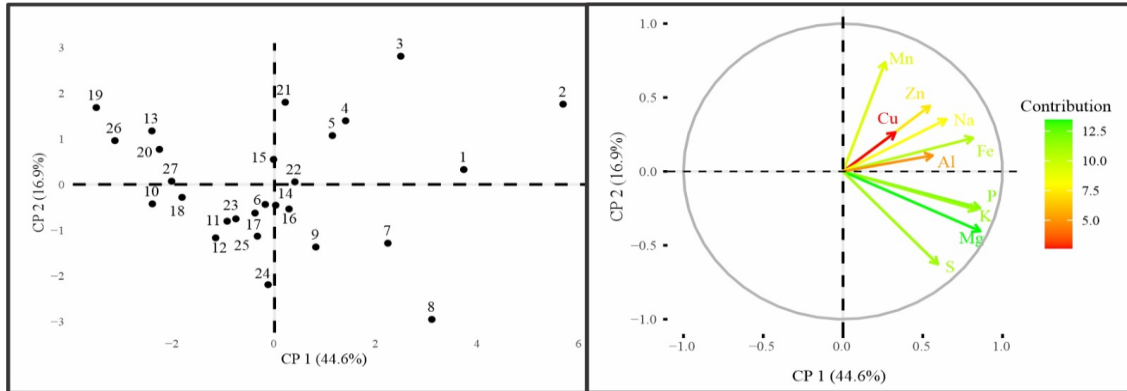


Figura 5. Diagrama de dispersão (a) e contribuição das variáveis e (b) em relação aos componentes principais relacionados ao manejo de diferentes áreas de trigo no Alto Paranaíba, MG.

De modo geral avaliando-se o diagrama de dispersão, a ocorrência de três grandes grupos, o primeiro grupo foi formado pelas áreas 1, 2, 3, 4, 5, 21 e 22, descritos na tabela 1, cujo plantio foi conduzido em área de sequeiro, com as cultivares BRS264 e OR 1403. Nestas áreas, as culturas antecessoras ao trigo foram milho, soja e pousio, que apresentaram boa correlação com o Mn, Zn, Cu, Na, Al e Fe. Esta tendência corrobora com os resultados de Souza et al., (2013) que concluíram que a linhagem de trigo BRS 264 foi eficaz no acúmulo de Fe e outros nutrientes. O segundo grupo foi formado pelas áreas 7, 8, 9, 14 e 16, descritos na tabela 1, cujo plantio também foi de sequeiro, cultivares BRS 264, OR Feroz e OR1403, tendo como culturas antecessoras soja, pousio e cenoura, que se associaram bem com o P, K, Mg e S. O terceiro e maior grupo foi composto pelos demais tratamentos, que se dispuseram com pouca associação com os nutrientes minerais do solo.

Ademais, com base na análise de componentes principais, pressupõem-se que o manejo das áreas agrupadas foi favorável ao acúmulo de nutrientes nos grãos de trigo. Neste sentido, o grupo 1 apresentou maior afinidade/correlação com os teores de Mn e Fe, Zn, Na, Al e Cu e correlação intermediária com os macronutrientes. Por outro lado, o grupo 2 apresentou maior afinidade com o P, K, Mg e S e baixa afinidade com os micronutrientes. Por sua vez, o grupo 3 não apresentou afinidade com nenhum dos nutrientes avaliados neste estudo, assim como Ávila et al., (2019) que verificaram comportamento inverso quanto ao acúmulo de Fe e Zn nos grãos entre cultivares de trigo. Imtiaz et al. (2003) também concluiu que plantas de trigo submetidas ao fornecimento de Zn apresentaram menores teores de Fe. Por outro lado, Pahlavan-Rad e Pessarakli (2009) descreveram uma correlação positiva em grãos de trigo entre acúmulo de Fe e Zn concluindo que a interação entre estes elementos no grão de trigo pode ser influenciada

por diversos fatores, incluindo cultivares, manejo da adubação, correção e condições edafoclimáticas.

Nota-se ainda que, a maior dissimilaridade entre os tratamentos ocorreu para os tratamentos 2 e 19 para o componente principal 1 e entre os tratamentos 8 e o 3 para o componente principal 2. Logo, pode ser esperado que o histórico de manejo nestas áreas tende a ser mais dissimilar em comparação aos demais.

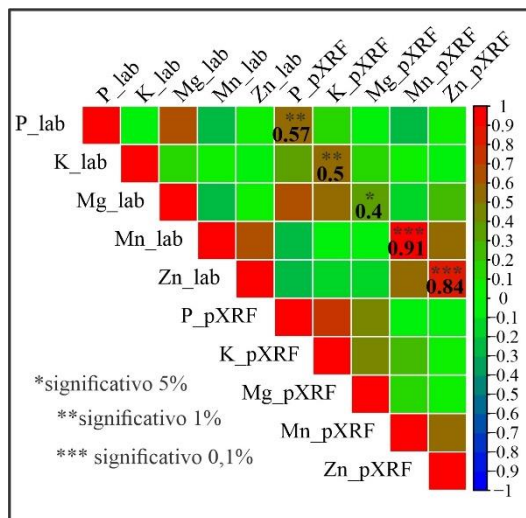


Figura 6. Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson, levando em consideração dados de manejo entre as variáveis que compõem o grupo de metodologias de análise. No eixo vertical da direita, as tonalidades das cores, as estimativas de correlação e a significância são representadas pelo teste t, significativo a 5% (*), a 1% (**) e a 0,1% (***). Na diagonal inferior e no eixo horizontal superior estão representadas as metodologias de análises.

3.2 Avaliação dos teores de nutrientes pelo ICP e pXRF

A Figura 6 mostra as estimativas de correlação dos elementos dispostos no grão de trigo utilizando o método tradicional de laboratório (AA) e o espectrômetro de fluorescência de raio X portátil (pXRF). Quando comparados os métodos, o P, K, Mg, Mn, e Zn apresentam correlação positiva. Dentre estes elementos, o Mn e Zn foram os nutrientes que apresentaram maiores coeficientes de correlação entre as duas técnicas de análise, portanto, o equipamento portátil pXRF é capaz de substituir a espectroscopia de absorção atômica (AA). Vários grupos de pesquisa mostraram que as concentrações de elementos químicos menores e maiores podem ser medidas com precisão usando espectrômetros portáteis de XRF (Hall et al., 2014; Quye-Sawyer et al., 2015; Mejía-Piña et al., 2016; de Winter et al., 2017; Arenas-Islas et al., 2019).

No caso descrito, os resultados obtidos através da técnica de ICP (Tabela 3) indicam que algumas das áreas estudadas apresentam teores relativamente elevados de Zn e Fe. Logo, pode-se considerar que nestas áreas podem ser produzidos grãos de trigo considerados biofortificados em ambos os nutrientes, embora nenhum manejo específico tenha sido feito para esse fim.

4. Conclusão

Os grãos de trigo cultivados no Alto Paranaíba (MG) atingem teores alvos da biofortificação.

A análise química pelo pXRF foi eficaz para analisar de forma qualitativa a composição elementar dos grãos de trigo.

5. Referências

- ARENAS-ISLAS, D.; HUERTA-DIAZ, M. A.; NORZAGARAY-LOPEZ, C. O.; MEJIA-PIÑA, K. G.; VALDIVIESO-OJEDA, J. A.; OTERO, X. L.; ARCEGA-CABRERA, F. Calibration of portable X-ray fluorescence equipment for the geochemical analysis of carbonate matrices. *Sedimentary Geology*, **Sedimentary Geology**, p.391. 2019.
- ÁVILA, F. W.; KACHINSKI, W. D.; MULLER, M. M. L.; MENDES, M. C.; TITSKI, L. H. K.; VIDIGAL, J. C. B. **AGRONOMIC BIOFORTIFICATION OF WHEAT GRAINS WITH ZINC**. VI Reunião Paranaense de Ciência do Solo – RPCS. Ponta Grossa-PR. 2019.
- BEEBE, S.; GONZALEZ, A. V.; RENGIFO, J. Research on trace minerals in the commonbean. **Food Nutrition**. Bull.21, 387–391. 2000.
- BOURIS, H. E., SALTZAMAN, A. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Glob. Food Sec.** 12, 49–58. 2017.
- BOUIS, H. E., HOTZ, C., McCLAFFERTY, B., MEENAKSHI, J. V., PFEIFFER, W. H. Biofortificação: uma nova ferramenta para reduzir a desnutrição de micronutrientes. **Alimentos Nutr Bull.** 32 (1 suplemento), 31-40. 2011.
- CAKMAK, I. HarvestPlus Zinc Fertilizer Project: HarvestZinc. **Better Crops**, v. 96, n. 2, p. 17–19, 2012.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; DECHEN, A.R. Efeitos do pH e da incubação na extração do manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 6:83-8,1982.
- CAST (Council for Agricultural Science and Technology). **Food biofortification- reaping the benefits of science to overcome hidden hungera paper in the series on the need for agricultural innovation to sustainably feed the world by 2050**. Issue Paper 69. Ames, IA: CAST. 2020.
- CRUZ, R. A.; **Ronald Fisher e a eugenia: estatística, evolução e genética na busca da civilização permanente**. Dissertação de doutorado, PUC-SP. São Paulo, 2016.
- DA SILVA, A. C.; TRIANTAFYLLOU, A.; DELMELLE, N. Calibrações portáteis de fluorescência de raios X: Fluxo de trabalho e diretrizes para otimizar a análise de amostras geológicas. **Chemical Geology**, Volume 623, 2023.
- DE WINTER, N. J.; SINNESAEEL, M.; MAKARONA, C.; VANSTEENBERGE, S.; CLAEYS, P. Trace element analyses of carbonates using portableand micro-X-rayfluorescence: Performance and optimization of measurement parameters and strategies. **Journal of Analytical AtomicSpectrometry**,32, 1211–1223. 2017.
- ELE, H.; WU, M.; SU, R.; Z. ZHANG.; CHANG, C.; PENG, Q.; DONG, Z.; PANG. J.; LAMBERS, H. Strong phosphorus (P)-zinc (Zn) interactions in a calcareous soil-alfalfa system suggest that rational P fertilization should be considered for Zn biofortification on Zn-deficient soils and phytoremediation of Zn-contaminated soils. **Plant Soil** (2021) 461:119–134

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília: **Embrapa technological information**, 2009. 628p.

GOVINDARAJ, M.; RAI, K. N.; CHERIAN, B.; PFIFFER, W. H.; KANATTI, A.; SHIVADE, H. Breeding biofortified pearl millet varieties and hybrids to enhance millet markets for human nutrition. **Agriculture**. 9:106. 2019.

HALL, G. E. M; BONHAM-CARTER, G. F.; BUCHAR, A. **Evaluation of portable X-ray fluorescence (pXRF) in exploration and mining: Phase 1, control reference materials**. 2014.

IMTIAZ, M.; ALLOWAY, B. J.; SHAH, K. H.; SIDDIQUI, S. H.; MEMON, M. Y.; ASLAM, M.; KHAN, P. Zinc nutrition of wheat: II: interaction of zinc with other trace elements. **Asian Journal of Plant Sciences**. 2:156-160. 2003.

MACHADO, C. T. T. **Caracterização de genótipos de milho quanto a parâmetros morfológicos fisiológicos e microbiológicos associados à eficiência de absorção e uso de fósforo**. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2000. 365p. (Tese de Doutorado)

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, Potafos, 1998. 319p.

MARSCHNER, P. Nutrição mineral de Marschner de maiores plantas, **Academic Press, Elsevier**, 3ª ed. EUA Marschner. 2012.

MARROCOS, P. C. L.; MARTINEZ, H. E. P.; VENEGAS, V. H. A.; BRUCKNER, C. H.; CANTARUTTI, R. B. Interação P x Fe em mudas de Macadâmia. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 25, n. 2, p. 323-325, ago. 2003

McGLADDERY, C.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; PAULETTE, L.; PODAR, D.; PEARSON, D.; KUSI, N. Y. O.; DUDA, B. Avaliação elementar da vegetação por espectrometria portátil de fluorescência de raios X (PXRF). **Revista de Gestão Ambiental**, p.210-225, 2018.

Mejía-Piña, K. G.; Huerta-Diaz, M. A.; González-Yajimovich, O. **Calibration of handheld X-rayfluorescence (XRF) equipment for optimum determination of elemental concentrations in sediment samples**. *Talanta*,161, 359–67. 2016.

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. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.471-537.

OURY, F.-X. et al. Genetic variability and stability of grain magnesium, zinc and iron concentrations in bread wheat. *European Journal of Agronomy*, v. 25, n. 2, p. 177–185, 2006.

Pahlavan-Rad, M. R.; Pessarakli, M. Response of wheat plants to zinc, iron, and manganese applications and uptake and concentration of zinc, iron, and manganese in wheat grains. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2009; 40:1322-1332.

ROZEIRA, J. A. A. **Trigo biofortificado com zinco: caracterização tecnológica de cultivares**. 2020. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

SILVA, P. A. G.; CHIORATO, A.F.; GONÇALVES, J.G.R.; PERINA, E.F.; CARBONELL, S.A.M. Análise da adaptabilidade e estabilidade de produção em ensaios regionais de feijoeiro para o Estado de São Paulo. **Revista Ceres**: Viçosa, v. 60, n.1, p. 059-065, 2013.

QUYE-SAWYER, J.; VANDEGINSTE, V.; JOHNSTON, K. J. Application of portable energy-scattered X-ray fluorescence spectrometry for carbonate studies: opportunities and challenges. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 30, n. 7, pág. 1490-1499, 2015.

USEPA, 2007. Method 3051a: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Test Methods Eval. Solid Waste 1–30.