



MARCO RENAN FÉLIX

**VARIABILIDADE GENÉTICA EM LINHAGENS DE ARROZ
PARA BIOFORTIFICAÇÃO COM SELÊNIO**

**LAVRAS – MG
2019**

MARCO RENAN FÉLIX

**VARIABILIDADE GENÉTICA EM LINHAGENS DE ARROZ PARA
BIOFORTIFICAÇÃO COM SELÊNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho
Orientadora

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme
Coorientador

**LAVRAS - MG
2019**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Félix, Marco Renan.

Variabilidade genética em linhagens de arroz para biofortificação
com selênio / Marco Renan Félix. – 2019.

70 p. il

Orientadora: Flávia Barbosa Silva Botelho.

Coorientador: Luiz Roberto Guimarães Guilherme

Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. *Oryza sativa* L.. 2. Melhoramento genético. 3. Biofortificação.
4. Segurança alimentar. I. Botelho, Flávia Barbosa Silva. II.
Guilherme, Luiz Roberto Guimarães. III. Título.

MARCO RENAN FÉLIX

**VARIABILIDADE GENÉTICA EM LINHAGENS DE ARROZ PARA
BIOFORTIFICAÇÃO COM SELÊNIO**

**GENETIC VARIABILITY IN RICE LINES FOR BIOFORTIFICATION WITH
SELENIUM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de fevereiro de 2019.

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme	UFLA
Prof. Dr. Evandro Novaes	UFLA
Dr. Fábio Aurélio Dias Martins	EPAMIG

Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho
Orientadora

**LAVRAS - MG
2019**

À minha família, ao meu pai Gilmar, à minha Mãe Nelma e à minha avó Maria.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela minha vida, pela proteção diária e coragem para seguir adiante, sou eternamente grato por esta e outras oportunidades.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Biologia e ao programa de Genética e Melhoramento de Plantas, sou grato por participar de um programa em que já se formaram grandes nomes do melhoramento genético de plantas do Brasil.

Aos meus pais, Gilmar e Nelma e familiares, por todos os ensinamentos, exemplo, amor, incentivo, confiança em mim depositados e sempre ao meu lado em todos os momentos. À família Marcos, Vânia, Lucas, Tiago e Vanessa, sou-lhes grato por tudo.

Ao Dr. Jaison - Embrapa (*in memoriam*), o principal responsável por esta conquista, sou eternamente grato por ter acreditado em mim.

À professora Flávia, pela orientação e ensinamentos, ao longo do mestrado, pela contribuição à minha formação e, acima de tudo, pela confiança e aconselhamentos.

Aos amigos do grupo MelhorArroz, pela convivência, disponibilidade e toda a ajuda na condução dos experimentos, sou grato por participar desta equipe.

Ao professor Luiz Roberto Guimarães Guilherme, pela coorientação, ensinamentos, por ser o idealizador do projeto e capitanear recurso, para realização deste trabalho, sou grato por participar de sua equipe.

Aos amigos da turma de mestrado, que são pessoas excelentes, sempre dispostas a ajudar, compartilhar de todos os momentos, sou muito grato por participar desta turma.

Aos funcionários do setor de Agricultura e EPAMIG, em especial, ao Janir, que foi fundamental para a condução deste experimento.

Aos técnicos, doutores e mestres do DCS/UFLA, que me auxiliaram, em todas as etapas do experimento, em especial, ao Josimar, Filipe, Lívia, Alexandre, Geila e Ana Paula.

Aos membros da banca, ao Dr. Fábio pelos conselhos e por me auxiliar no experimento, ao professor Evandro, que é um exemplo de profissionalismo.

Aos professores do programa pelos ensinamentos transmitidos, ao longo destes dois anos, em especial, à professora Flávia Avelar, que participou de minha banca de qualificação.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas do GEN e Fitotecnia pela troca de conhecimento e ajuda.

À família república Barafunda, por todo companheirismo e amizade, sempre dispostos a ajudar, em qualquer situação, em especial, aos fundadores Da Praça e Carrero.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Atualmente, aproximadamente, 90% dos países apresentam algum tipo de má nutrição, em sua população, seja ela pela fome ou pela chamada fome oculta, à qual se refere como uma carência não explícita de um ou mais micronutrientes no organismo, acarretando em deficiência de nutrientes. Portanto pesquisas estão sendo realizadas, a fim de minimizar os efeitos da má nutrição. Dentre os micronutrientes estudados, destaca-se a utilização do selênio (Se), um mineral com alto poder antioxidante, sendo importante no funcionamento e manutenção do organismo dos seres vivos e, também, benéfico para as plantas. Cereais como o arroz (*Oryza sativa* L.) se destacam, por serem cultivados e consumidos, em todos os continentes, desempenhando papel estratégico tanto no aspecto econômico quanto social. Dessa forma, com o presente trabalho, objetivou-se verificar a existência de variabilidade genética, em linhagens de arroz de terras altas, quanto à capacidade de absorver selênio e translocá-lo para o grão por meio da biofortificação agrônômica. Foram avaliados 20 genótipos dos ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), provenientes do programa de melhoramento de arroz de terras altas da Universidade Federal de Lavras. Os experimentos foram conduzidos, no município de Lavras, nos ambientes da Fazenda Muquém (UFLA) e EPAMIG/Subestação. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados com o emprego de parcela subdividida, no espaço com três repetições, na forma de aplicação de selênio incorporado à ureia, na adubação de cobertura, com o efeito da aplicação da fonte de selenato de sódio na dose de 80 g ha⁻¹ de Se. As características avaliadas foram altura de plantas, peso de mil grãos, renda, rendimento de grãos inteiros, produtividade de grãos, teor de selênio no grão e na parte aérea da planta. A aplicação de Se aumentou o rendimento de grãos inteiros de arroz em ambos os ambientes. Observou-se variabilidade genética, quanto ao acúmulo de Se no grão, portanto todos os genótipos foram biofortificados, atingindo o máximo de 2,58 mg kg⁻¹ de Se no grão. Os resultados mostram que é possível aumentar o teor de Se em arroz com a estratégia de fertilização e a aplicação de selênio incorporado à ureia, isto é, utilizando-se desta estratégia, para minimizar a deficiência desse nutriente na população, visto que esse elemento é pouco representativo na maioria dos solos cultivados. Deste modo, essa estratégia é vantajosa, pelo fato de não exigir mudanças de comportamento dos consumidores e não alterar aparência, gosto, textura ou forma de preparo do alimento, sendo uma alternativa viável, efetiva e sustentável, para combater a desnutrição das populações carentes e resultar em benefícios para a saúde.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L. Melhoramento genético. Biofortificação. Segurança alimentar.

ABSTRACT

Currently, approximately 90% of the countries have some malnutrition in their population, be it hunger or the denominated hidden hunger, a diet that presents itself as a non-explicit lack of one or more micronutrients in the body, resulting in nutrient deficiency. Researches have been conducted to minimize the effects of the malnutrition. Among the micronutrients studied, the use of selenium (Se), a mineral with high antioxidant potential, is essential for the functioning and maintenance of the organisms of living beings and beneficial to plants. Cereals such as rice (*Oryza sativa* L.) are prominent as crops cultivated and consumed on all continents, playing a strategic role in both economic and social aspects. The objective of this work was to verify the existence of genetic variability in upland rice strains regarding the capacity to absorb selenium and translocate it to the grain through agronomic biofortification. We evaluated 20 genotypes through the value for cultivation and use (VCU) derived from the upland rice breeding program of the Universidade Federal de Lavras. We conducted the experiments at the Fazenda Muquém (UFLA) and EPAMIG/Substation, in the municipality of Lavras. The experimental design was in randomized blocks employing plots subdivided in space with three replicates in the form of selenium application incorporated to urea in top-dressing fertilization, with the effect of the application of a source sodium selenate at the dose of 80 g ha⁻¹ of Se. We evaluated the characteristics of plant height, the weight of a thousand grains, income, whole grain yield, grain productivity, and selenium content in the grain and the plant shoot. The application of Se increased the yield of whole rice grains in both environments. We observed genetic variability regarding the accumulation of Se in the grain. Therefore, all genotypes were biofortified, reaching the maximum content of 2.58 mg kg⁻¹ of Se in the grain. The results show that it is possible to increase the content of Se in rice through the application of selenium incorporated to urea, that is, if using this strategy to minimize the deficiency of this nutrient in the population since this element is little representative in most cultivated soils. Thus, this strategy is advantageous for not requiring changes in consumer behavior and not altering the appearance, taste, texture, or preparation form of the food. Thus, it is considered a viable, effective, and sustainable alternative to fight the malnutrition of underprivileged population and benefit their health.

Keywords: *Oryza sativa* L. Genetic breeding. Biofortification. Food security.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - USA Rice Federation (2018).	15
Figura 2 - Variações mensais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, no período de outubro a abril da safra 2017/2018, na cidade de Lavras - MG.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição nutricional média de arroz polido tipo 1 cru.....	15
Tabela 2 - Valores estimados para a ingestão dietética de referência recomendada de selênio (RDI).	23
Tabela 3 - Propriedades químicas e físicas do solo antes da instalação dos experimentos.....	33
Tabela 4 - Linhagens do programa de melhoramento genético de arroz de terras da UFLA, em parceria com a Embrapa Arroz e Feijão e Epamig, que foram avaliadas na safra 2017/18.....	34
Tabela 5 - Resultado da digestão do fertilizante nitrogenado enriquecido com Se utilizado na cobertura.	37
Tabela 6 - Resumo das análises de variâncias individuais, considerando os dois ambientes, para as características analisadas: altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha^{-1}).	42
Tabela 7 - Médias dos caracteres altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha^{-1}), com relação à subparcela, com ou sem selênio incorporado na ureia, nos dois ambientes avaliados.....	43
Tabela 8 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função da interação genótipos com a fonte de variação selênio da subparcela, na análise individual na EPAMIG.	44
Tabela 9 - Resumo da análise de variância individual dos teores de selênio (Se) nos grãos (mg kg^{-1}) e parte aérea (mg kg^{-1}) de arroz de terras altas nos dois ambientes.	45
Tabela 10 - Médias dos teores de selênio em grãos e parte aérea de arroz (P.A.) em (mg kg^{-1}), em análise individual dos experimentos.	47
Tabela 11 - Resumo da análise conjunta dos caracteres: altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de arroz de terras altas nos dois ambientes.....	48

Tabela 12 - Médias dos caracteres altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha ⁻¹), avaliados com relação à subparcela, com ou sem selênio incorporado na ureia, na análise conjunta dos dados.	49
Tabela 13 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função do desdobramento de genótipos, dentro dos diferentes ambientes cultivados, para o caráter com ou sem selênio aplicado na subparcela.	50
Tabela 14 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função do desdobramento de genótipos, dentro da aplicação ou não de selênio na subparcela, para o mesmo ambiente cultivado.	51
Tabela 15 - Médias dos caracteres: altura (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), rendimento de grãos inteiros (%), renda (%) e produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) em função dos genótipos na análise conjunta.	53
Tabela 16 - Médias dos caracteres PMG (g) e Rendimento de Grãos inteiros (kg ha ⁻¹) em função do desdobramento da interação ambiente com selênio da subparcela na análise conjunta.....	54
Tabela 17 - Resumo da análise conjunta dos teores de selênio (Se) nos grãos (mg kg ⁻¹) e parte aérea (mg kg ⁻¹) de arroz de terras altas nos dois ambientes.....	54
Tabela 18 - Médias dos teores do micronutriente selênio, nos grãos e parte aérea de arroz (mg kg ⁻¹), em função da interação genótipos por ambientes e do desdobramento de tratamentos dentro de locais e de locais dentro de tratamentos da análise conjunta.	56
Tabela 19 - Ingestão diária de Se (µg dia ⁻¹), de acordo com o consumo médio de arroz pela população brasileira e pelos habitantes do estado de Minas Gerais, dos 20 genótipos de arroz de terras altas.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Cultura do arroz: importância no Brasil e no mundo	14
2.2	O selênio (Se)	18
2.3	Selênio em plantas e seus benefícios para a saúde humana	20
2.4	Biofortificação de alimentos	25
2.5	Estratégias de melhoramento aplicadas à biofortificação do arroz	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	Local dos experimentos	32
3.2	Genótipos	33
3.3	Plano experimental e condução dos experimentos	34
3.4	Características Avaliadas	35
3.5	Análise de Selênio no tecido vegetal (USEPA 3051A)	36
3.6	Cálculo dos limites de detecção e quantificação	37
3.7	Análise estatística	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a população mundial deverá crescer para 10 bilhões de pessoas até 2050 (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2018). Nos dias atuais, cerca de 90% dos países apresentam algum tipo de má nutrição em sua população, ocasionando a fome ou fome oculta, caracterizada pelo consumo de alimentos com baixo teor nutritivo, particularmente, no que diz respeito aos micronutrientes, acarretando deficiências nutricionais no indivíduo. Dessa forma, a demanda mundial da população, para a produção de alimentos com alta qualidade nutricional, é um grande desafio da agricultura moderna.

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, caracterizando-se como principal alimento para mais de 50% da população mundial. É cultivado e consumido, em todos os continentes, e sua importância é destacada, conseqüentemente, em países em desenvolvimento, tais como o Brasil, desempenhando papel estratégico em níveis econômico e social (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2018). É um dos alimentos com melhor balanço nutricional, excelente fonte de energia, vitaminas e de proteínas necessárias ao homem, sendo considerada a espécie de maior potencial de aumento de produção no combate à fome mundial (BORÉM; RANGEL, 2015). A cadeia orizícola apresenta importante papel na ótica cultural, social e econômica brasileira. O arroz é, tradicionalmente, um dos produtos alimentícios mais consumidos no país, sendo o seu consumo anual estimado em 12,07 milhões de toneladas, na safra 17/18 e seu consumo per capita é de 34,5 kg por ano (CONAB, 2017; FAO, 2015).

No entanto a produção intensiva de alimentos não é suficiente, para garantir as necessidades nutricionais da população humana e animal, uma vez que os solos brasileiros, em sua maioria, são pobres em alguns elementos, dentre os quais o selênio (GABOS; ALLEONI; ABREU, 2014). A preocupação com o teor de Se nos alimentos se deve ao fato de esse elemento ser essencial à manutenção da vida humana e animal (VOLP et al., 2010). O Se atua, em específico, na eliminação de radicais livres, substâncias capazes de causar vários tipos diferentes de câncer (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011). Sendo assim, o Se deve ser ingerido, por meio de alimentos de origem vegetal, animal ou pelo uso da gestão integrada da nutrição e alimentação.

Portanto, ao se considerar que o arroz é o alimento básico predominante, em mais de 30 países e que a deficiência do Se atinge, aproximadamente, um bilhão de pessoas no mundo (WHITE; BROADLEY, 2009), essa cultura agrícola apresenta enorme potencial, para estudos que visem diminuir a deficiência de Se na população mundial. Entretanto, no Brasil, há

poucos estudos deste tipo, embora haja indícios de baixa ingestão de Se pela população (MAIHARA et al., 2004). Com o intuito de produzir alimentos mais completos e saudáveis, para o consumo humano e animal, uma estratégia bastante utilizada é a biofortificação, a qual consiste no enriquecimento de alimentos com nutrientes e pode ser realizada por meio de melhoramento genético ou manejo agrônômico.

A biofortificação possui um grande potencial, para aumentar a disponibilidade dos elementos minerais aos alimentos provenientes das culturas, sem comprometer a sua produtividade. Neste caso, é necessário definir a melhor maneira do uso de diversas fontes e níveis de microelementos. No caso específico do selênio, há necessidade de definir dose, fontes e formas de sua aplicação nas culturas.

A biofortificação agrônômica com selênio (Se), que consiste, basicamente, no aumento da concentração desse elemento, nas culturas agrícolas, por meio de sua introdução na adubação das plantas, tem mostrado resultados satisfatórios (GRAHAM et al., 2007). A adição de Se, via fertilizantes, está envolvida na melhoria da qualidade dos produtos agrícolas. Desse modo, o Se aumenta o teor de selenocisteína e selenometionina, as quais são substâncias essenciais para a saúde humana e animal (RAYMAN, 2012). Chen et al. (2002) verificaram que o teor de Se, na cultura do arroz, aumentou com a introdução desse elemento na adubação, o que indica que esta técnica é útil para elevar a ingestão de Se pela população.

Desde 1984 a suplementação de rações de animais com Se e a adição de selenato, em fertilizantes NPK, para uso em culturas e pastagens, na Finlândia, provou ser uma maneira eficaz, segura e controlada de levar o consumo de selênio da população ao nível recomendado (ALFTHAN et al., 2015). Assim como ocorre na Finlândia, a inclusão do selênio, nos fertilizantes brasileiros, pode ser uma alternativa, para que esse elemento atinja a cadeia alimentar e minimize os potenciais riscos de deficiência em Se na população, pelo consumo de alimentos biofortificados. Sendo assim, com as recentes pesquisas sobre a biofortificação com Se, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio de instrução normativa nº 46 de 22 de Novembro de 2016, adotou garantia mínima, para a adição de Se em fertilizantes, para fins comerciais no Brasil (BRASIL, 2016).

No entanto a seleção de linhagens de arroz, visando à acumulação de selênio, é um ponto inicial para a obtenção de linhagens mais responsivas à biofortificação agrônômica e genética. O objetivo principal deste trabalho foi verificar a existência de variabilidade genética, em linhagens de arroz de terras altas, quanto à capacidade de absorver selênio e translocá-lo para o grão, o qual contribuirá com mais informações, para dar respaldo à inclusão do selênio, nos fertilizantes nacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do arroz: importância no Brasil e no mundo

O arroz é uma gramínea autógama com boa capacidade de perfilhamento, de origem aquática, pertencente ao gênero *Oryza*, o qual é composto por mais de 20 espécies selvagens, das quais somente duas são domesticadas, a *Oryza glaberrima* originária e cultivada na África ocidental e a *Oryza sativa*, originária do Sudeste Asiático, muito comum nas zonas tropicais e temperadas, sendo cultivada em todo o mundo (BAMBARADENIYA; AMARASINGHE, 2003; HILBERT et al., 2017).

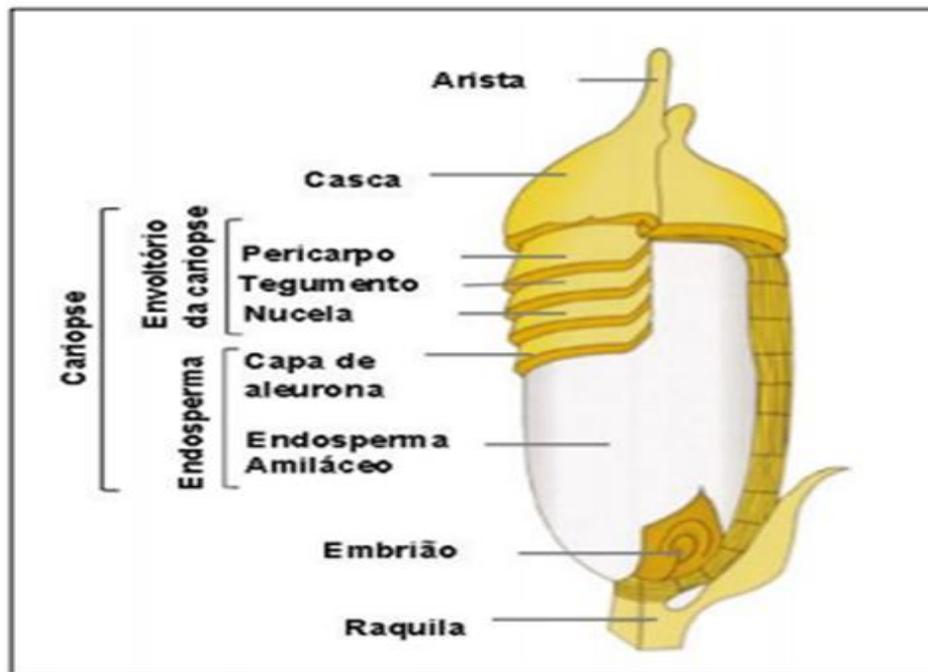
O arroz (*Oryza sativa*) é um dos alimentos mais importantes, para a segurança alimentar do mundo, pois, além de fornecer um excelente equilíbrio nutricional, é uma cultura rústica de ampla adaptabilidade, o que faz dela uma espécie de grande potencial de aumento de produção para o combate da fome e fome oculta no mundo. Em populações em desequilíbrio alimentar, utilizando-se de algumas estratégias, como a biofortificação e fortificação de grãos, além disso, tem um papel relevante na geração de renda e emprego.

A espécie *Oryza sativa* L. é diploide com $x = 12$ cromossomos ($2n = 2x = 24$) (HILBERT et al., 2017). Nos 12 cromossomos da espécie *Oryza sativa*, subespécie japônica, os pesquisadores identificaram 400 milhões de bases de DNA e 37.544 genes. Sendo assim, pelo fato de o seu genoma ser diploide e compacto, o arroz é considerado, também, uma espécie modelo para estudos genômicos (SRIVASTAVA et al., 2018).

Ocupando a terceira posição entre os grãos agrícolas mais produzidos no mundo, o arroz está atrás apenas do milho e do trigo. O cereal é alimento básico da dieta de mais de 50% da população mundial, e o mais importante, na maioria dos países em desenvolvimento. A cadeia produtiva desse cereal é capaz de influenciar, diretamente, na renda, saúde, meio ambiente e no bem-estar social dessas populações.

O grão de arroz (Figura 1) é considerado uma excelente fonte de energia, pela alta concentração de amido, fornecendo também proteínas, vitaminas, minerais, fibras e por possuir baixo teor de lipídios (TABELA 1), fornecendo, em média, 715 kcal per capita por dia, 27% dos carboidratos, 20% das proteínas e 3% dos lipídios da alimentação (KENNEDY; BURLINGAME, 2003). Entretanto a composição do grão e de suas frações está sujeita às diferentes variações dos ambientes, aos diferentes genótipos de manejo, de processamento e de armazenamento, refletidos pelas propriedades funcionais do arroz (ZHOU et al., 2002).

Figura 1 - USA Rice Federation (2018).



Fonte: Do autor (2019).

Tabela 1 - Composição nutricional média de arroz polido tipo 1 cru.

INFORMAÇÃO NUTRICIONAL	Porção de 100g
Umidade	13 %
Valor Energético	346 kcal
Carboidratos	79,1 g
Fibra Alimentar	1,69 g
Proteínas	7,05 g
Lipídeos	0,51 g
Cinzas	0,48 g
Cálcio	4,81 mg
Magnésio	29,6 mg

Fonte: Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TBCA (2017).

Apesar de o grande potencial nutricional, pequena quantidade de arroz é consumida como ingrediente, em produtos processados, sendo o seu maior consumo na forma de grãos (SANTOS; STONE; VIEIRA, 2006). Em relação às principais formas de consumo de arroz no Brasil, destacam-se os grãos inteiros. O arroz é classificado em três tipos de produtos: arroz beneficiado polido, parboilizado e integral. O primeiro é a forma predominante consumida pela grande parte da população brasileira e é obtido por meio do descasque e do polimento do grão integral. Já o parboilizado caracteriza-se como o grão que, ainda em casca,

foi submetido a um processo hidrotérmico que provoca a gelatinização parcial do amido, sendo, posteriormente seco, descascado e polido. O arroz integral refere-se àquele do qual somente a casca é retirada durante o processo de beneficiamento (BRASIL, 2009; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2013).

Sobre a produção nacional, a safra brasileira de arroz 2016/17 foi superior 16,3% em relação à safra 2015/16, atingindo 12,33 milhões de toneladas. Essa expansão da produção ocorre, em virtude da atual boa condição climática nas lavouras e da conseqüente normalidade da produtividade na cultura, após o forte declínio, na última safra, influenciado pelas fortes chuvas na Região Sul do país. Já em relação à produtividade, na safra 2016/17, obteve-se uma média de 6.224 kg ha^{-1} , um aumento de 17,9% em relação à safra anterior (CONAB, 2017). A safra nacional de arroz 2017/18 foi de 12,07 milhões de toneladas, dentro da média histórica produtiva de 12,0 milhões de toneladas. No total, o consumo mundial poderá atingir 487,9 milhões de toneladas, aumento de 1,33% quanto à safra 2016/17. É importante salientar que é a primeira vez, nos últimos anos, que o consumo mundial será superior à produção mundial (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019).

No mercado internacional, segundo dados do United States Department of Agriculture (USDA), a produção mundial de arroz base beneficiado ficará em 487,8 milhões de toneladas, na safra 2018/19, retração, de aproximadamente, 800 mil toneladas em relação à safra 2017/18. Esse resultado é reflexo, basicamente, da expectativa de retração na produção chinesa, em decorrência de uma redução de área, apesar da retomada da produção norte-americana. Os maiores produtores mundiais de arroz são China com 144,99, Índia com 110,0 e Indonésia com 37,0 milhões de toneladas de arroz beneficiado. Já o Brasil está entre os dez principais produtores mundiais com 12,07 milhões de toneladas e 8,38 milhões de toneladas de arroz beneficiado e é o maior produtor e consumidor de arroz fora da Ásia (CONAB, 2019).

A produção mundial 2018/19 está estimada em 481,5 milhões de toneladas, segundo o departamento norte-americano, volume 1,96% maior que o da temporada anterior, em especial, pela expansão de área. As colheitas poderão ser maiores, na Austrália, Birmânia, Brasil, Filipinas, Colômbia, Egito, Índia, Indonésia, Coréia do Norte, Paquistão, Tailândia e nos Estados Unidos, dentre os quais, Índia e Tailândia são os principais exportadores mundiais. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (2017), a produção nacional projetada, para 2024/25, é de 13,3 milhões de toneladas e um consumo de 12,2 milhões de toneladas. Projeta-se um aumento de 7,2% na produção de arroz nos próximos 10 anos. O aumento projetado, para a produção, aparentemente é baixo, mas ele

equivale à projeção do consumo nos próximos 10 anos. A FAO (2015) projeta, para o próximo decênio, um consumo per capita de arroz de 40,0 kg/hab/ano no mundo.

A lavoura orizícola no Brasil é cultivada em dois ecossistemas de produção denominados de várzeas e terras altas. O ecossistema de terras altas pode ser em sistema de sequeiro tradicional ou sistema de sequeiro sob irrigação suplementar. Conforme a CONAB (2019), a área produzida, na safra 2017/18 com arroz de terras altas, foi 27.32 % da área nacional, e a de arroz inundado equivalente a 72,68% da área, enquanto a produção foi 1.298,5 ton.ha⁻¹ e 10.772,5 ton.ha⁻¹ respectivamente. O arroz de terras altas encontra-se, principalmente, nos estados do Mato Grosso, Maranhão, Rondônia e Pará; caracterizam-se por serem cultivados fora das várzeas e por terem suas necessidades hídricas atendidas pela precipitação pluvial ou, de forma suplementar, pela irrigação por aspersão. A produtividade inferior, desta forma de plantio, em relação ao irrigado, muito se deve a fatores abióticos, a exemplo, o déficit hídrico, que é um fator limitante na produtividade do arroz de terras altas. A baixa disponibilidade de água é agravada, sobretudo, na fase reprodutiva, provocando a esterilidade das flores, menor número de grãos por panícula e gessamento dos grãos (PIEROBON et al., 2016; TAIZ; ZEIGER, 2010).

Dentre outras causas da baixa produtividade do arroz de terras altas está relacionada, segundo Guimarães et al. (2006), à instabilidade climática, durante o período do cultivo, e a ocorrência de doenças, basicamente, a brusone (*Magnaporthe grisea*) tem contribuído para a baixa produção da cultura em terras altas. Del Villar et al. (2005), ainda, destacam que há uma heterogeneidade tecnológica, na condução do arroz de terras altas, podendo variar de um baixo nível tecnológico até áreas com alta performance.

O arroz de terras altas se destacou com um papel importante como cultura pioneira no processo de ocupação agrícola dos cerrados, iniciado na década de 60, para implantação de pastagens (GUIMARÃES et al., 2006). Atualmente, o arroz de sequeiro ainda prevalece como cultura desbravadora, sendo usado, para a recuperação de áreas degradadas ou para preparar o solo, para posterior cultivo da soja ou milho, mas é importante que o arroz de terras altas volte a ter papel de destaque, no abastecimento nacional, pois é de fundamental importância ao suprimento para a população e à segurança alimentar.

2.2 O selênio (Se)

O selênio (Se) foi descoberto, em sua forma elementar, pelo químico sueco Jons Jacob Berzelius, em 1817, em um líquido pardo-avermelhado encontrado em câmaras de chumbo, usadas na produção de ácido sulfúrico (LENZ; LENS, 2009), assim sendo um não metal do grupo dos calcogênios (VIA ou 16 da tabela periódica). Tem densidade de $4,79 \text{ g cm}^{-3}$, possui massa atômica de $78,96 \text{ g mol}^{-1}$ e número atômico 34. Pode ser empregado como suplemento alimentar direto ou por sua adição ao solo para a absorção pelas plantas. Isso decorre de sua importância para a saúde humana e animal e seu papel no ambiente (AZEVEDO; CHASIN, 2003).

O selênio (Se) se encontra presente em materiais orgânicos e inorgânicos na natureza, sendo considerado essencial à vida humana e animal. O teor de Se no organismo humano depende de fatores como a quantidade e a mobilidade desse elemento no solo. Na natureza, o Se é encontrado, em vários componentes alimentares, nas formas inorgânicas de selenito (SeO_3^{2-}) e de selenato (SeO_4^{2-}), dos quais as plantas possuem a capacidade de absorver no solo e convertê-los na forma orgânica, em compostos selenometionina (SeMet) e selenocisteína (SeCis), que podem ser incorporadas às proteínas (WHITE et al., 2004).

Os solos intemperizados, com elevadas concentrações de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) na fração argila, podem adsorver Se na forma de selenito, o que reduz, assim sendo, sua disponibilidade para as plantas (ZHANG; SPARKS, 1990). O mesmo não ocorre com o Se, na forma de selenato, que é estável em ambientes oxidados, móvel no solo, em decorrência, disponível para as plantas. Além das diferenças de disponibilidade das formas de Se no solo, essas também diferem na absorção e na mobilidade do Se, no interior das plantas, em que o SeO_4^{2-} (selenato), absorvido de forma ativa, é mais facilmente transportado para a parte aérea, enquanto o SeO_3^{2-} (selenito), absorvido de forma passiva, tende a acumular nas raízes das plantas (LI; MCGRATH; ZHAO, 2008; ZHANG et al., 2003).

Nas plantas, o selênio apresenta propriedades químicas muito parecidas com as do enxofre, estando presente em aminoácidos sulfurados como selenometionina e selenocisteína, análogos do selênio orgânico dos aminoácidos metionina e cisteína (SCHRAUZER, 2003). Alguns estudos têm demonstrado que o Se, na forma de selenato, pode aumentar a absorção de enxofre (S), quando disponibilizado em baixas concentrações para as plantas (BOLDRIN et al., 2013; RAMOS et al., 2011; SOUZA et al., 2013), além de utilizar os mesmos transportadores e rota de assimilação desse macronutriente (PILON-SMITS; QUINN, 2010; ZHU et al., 2009).

As fontes ricas de alimentos em selênio incluem a castanha-do-pará, frutos do mar, fígado, rins e outras carnes. O conteúdo de selênio em grão depende do conteúdo do elemento no solo e da região de cultivo em que crescem os grãos (TERRY et al., 2000). A seleniomietionina é a forma mais encontrada de selênio nos vegetais (BRODY, 1999). É um importante aminoácido, porque compõe a enzima glutatona peroxidase que protege os glóbulos vermelhos contra a destruição (ROBERT et al., 1994). O selênio, também, pode interagir com a vitamina E, necessária para a antioxidação e, também, pode interagir com a niacina, vitamina C e betacaroteno. O Se pode ser empregado, para os mais diversos usos, como: pigmento na fabricação de vidros e cerâmicas, fabricação de latão, artigos de impressão, na formulação de reagentes químicos, indústrias de plásticos, lubrificantes, cosméticos e de fármacos, pequenas quantidades em vitaminas e suplementos, em rações animais e em agroquímicos, em geral (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

White et al. (2007) estimam que em torno de 0,5 a 1,2 bilhão de pessoas apresente deficiência em Se em razão do consumo de alimentos em áreas com baixa concentração desse elemento no solo. As deficiências, em selênio, zinco, ferro, iodo e vitamina A, são aquelas que mais causam preocupação, para a população mundial, em particular, nos países em desenvolvimento (MORAES et al., 2009, 2012). O teor médio de Se, nos solos finlandeses, era baixo, o que impossibilitava a sua absorção pelas plantas em quantidades satisfatórias. Em 1998, em experiência finlandesa de adicionar o Se (como selenato de sódio), em fertilizantes, constatou-se que os níveis de selênio disponíveis no solo haviam aumentado, significativamente, sem, contudo, negligenciar os riscos ao meio ambiente. Com isso, observou-se grande redução de patologias relacionadas às deficiências de Se na população daquele país (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

No Brasil, ainda são poucos os estudos com selênio no campo agrícola. No entanto, atualmente, com a preocupação de uma possível deficiência de Se na população, alguns estudos têm sido realizados (BOLDRIN et al., 2012, 2013; FERREIRA; GOMES; ROBERTO, 2002; GABOS; ALLEONI; ABREU, 2014; MARTINEZ et al., 2009; RAMOS et al., 2011, 2012; REIS et al., 2018).

2.3 Selênio em plantas e seus benefícios para a saúde humana

O selênio ainda não foi classificado como um elemento essencial para as plantas, contudo, é, a partir de produtos de origem vegetal e animal, que se podem adquirir as quantidades necessárias de Se para suprimentos diários. Sendo assim, o Se é considerado um elemento-traço essencial para a nutrição humana (BROADLEY et al., 2010). Vários estudos têm mostrado efeito benéfico de Se em plantas pelo fato de aumentar a atividade antioxidante, elevando sua produção vegetal (BOLDRIN et al., 2012; DJANAGUIRAMAN et al., 2005; FERNANDES, 2011; RAMOS et al., 2010).

Estudos mostram que a absorção do Se, na forma de selenato e sua distribuição nas plantas ocorre de forma mais rápida que o selenito (CARTES; GIANFERA; MORA, 2005). Souza et al. (1998) observaram que o acúmulo total de Se, em uma planta, pode ser até dez vezes maior, quando aplicado na forma de selenato que na forma de selenito. Poggi et al. (2000), em trabalho realizado com a cultura da batata, notaram que o selenato é mais eficiente transportado, por meio do floema, quando aplicado às folhas, como ocorre no xilema, quando aplicado via raízes.

O selenato, por apresentar semelhanças ao íon sulfato, é ativamente absorvido para as raízes por transportadores desse último (ASHER; BUTLER; PETERSON, 1977; TERRY et al., 2000). O mecanismo de absorção do Se, na forma de selenito, ainda não é totalmente compreendido, embora alguns autores assumam que ocorre de forma passiva (TERRY et al., 2000; WHITE et al., 2004). Além disso, as plantas podem absorver ativamente formas orgânicas de Se, como selenometionina (TERRY et al., 2000).

O grande interesse em saber como o Se é absorvido e se comporta nas plantas é em razão de sua importância na nutrição humana. As raízes das plantas podem absorver Se, como selenato, selenito ou compostos orgânicos de Se, tais como selenocisteína e selenometionina, mas não conseguem absorver o Se elementar na forma coloidal (WHITE et al., 2004). O selenato é transportado pela membrana plasmática das células da raiz por transportadores de alta afinidade para sulfato (HAWKESFORD; ZHAO, 2007), enquanto o selenito é carregado por transportadores de fosfato. O selenito é rapidamente convertido em compostos orgânicos de Se na raiz, enquanto o selenato é enviado ao xilema e transportado para a parte aérea, em que é assimilado em compostos orgânicos de Se e redistribuído dentro da planta de uma maneira análoga ao enxofre (LI; MCGRATH; ZHAO, 2008).

Em trabalho realizado na cultura do arroz (*Oryza sativa* L.), Boldrin et al. (2012) avaliaram o efeito da aplicação de doses de selenato e selenito na biofortificação com Se e

observaram que o selenato proporcionou maior eficiência na absorção de Se pelas raízes, aproveitamento pela planta, translocação para a parte aérea e teor desse elemento nos grãos. Notaram, ainda, que a aplicação do selênio na adubação alterou os teores de P, S e Zn, mas não afetou os de Fe nos grãos. Boldrin et al. (2013) avaliaram que a aplicação foliar e de solo de Se aumentou as concentrações de Se nos grãos de arroz, sendo a aplicação de solo mais eficaz, sendo assim, tanto o solo quanto a aplicação de Se foliar poderiam ser usados para aumentar o teor de Se em partes comestíveis.

Considerando a capacidade das plantas, em acumular e transformar formas inorgânicas de Se, em formas orgânicas biodisponíveis (selenoproteínas), principais fontes deste nutriente a humanos e animais (CUBADDA et al., 2010), a busca por estratégias visando aumentar o teor de Se em culturas alimentares tem ganhado muito atenção e importância nos últimos anos. Dentre essas estratégias, para aumentar os teores de Se em culturas agrícolas, a aplicação de Se via fertilizante mineral (biofortificação agrônômica), em regiões deficientes, como Finlândia, Reino Unido e Nova Zelândia, tem sido explorada, obtendo resultados positivos, aumentando a sua ingestão pela população e reduzindo, assim, potenciais riscos de deficiência (ALFTHAN et al., 2015; WINKEL et al., 2015). Outra forma estudada, para aumentar os teores de Se em plantas, é o uso de técnicas de melhoramento genético, visando aumentar a capacidade de absorção e sua acumulação nessas plantas (BAÑUELOS et al., 2015; POBLACIONES et al., 2014; REIS et al., 2014).

Na cultura do milho, Chilimba et al. (2011) demonstraram que a concentração de Se no grão foi até 10 vezes maior, nas culturas cultivadas em solos eutróficos, com pH naturalmente alto (>6,5). Portanto, sob essas condições, o Se torna-se consideravelmente mais disponível para as plantas pela maior solubilidade das espécies Se (IV) e pela oxidação de Se (IV). Quanto à avaliação dos grânulos de ureia enriquecida com selenato, Premarathna et al. (2012) observaram ser um fertilizante altamente eficaz para biofortificação de selênio em grãos de arroz com casca. A partir da aplicação com a ureia enriquecida com selenato, o selênio, nos grãos de arroz, foi acumulado, principalmente, na forma orgânica de selenometionina (SeM), que é altamente biodisponível.

Reis et al. (2018) demonstraram em seus estudos sobre a avaliação da biofortificação agrônômica, na cultura do arroz em condições de campo com nitrogênio (N) e Selênio (Se), que os nutrientes Se e N aumentaram a quantidade de albumina e glutamina em sementes de arroz. O teor de Se no grão variou de 0,03 a 0,35 mg kg⁻¹, permanecendo dentro do limite de segurança alimentar de 0,3 mg kg⁻¹ estabelecido pelo *Codex Alimentarius*.

Atualmente, no Brasil, alguns estudos vêm sendo realizados com arroz, alface, brócolis, rabanete, cenoura, feijão e milho, entre outras culturas, tanto com aplicação de Se via solo como via adubação foliar (BOLDRIN et al., 2012; FERNANDES, 2011; FIGUEIREDO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018; RAMOS et al., 2011; SILVA JÚNIOR et al., 2017).

O Se é um nutriente essencial que desempenha papel fundamental na biologia humana. Isso tem se tornado cada vez mais óbvio, à medida que novas pesquisas vêm mostrando seu papel inquestionável, em áreas importantes da saúde. Como um constituinte de 25 selenoproteínas, ele desempenha papéis fundamentais, no sistema imunológico, reduzindo infecções virais, sendo essencial para a fertilidade e reprodução, no metabolismo do hormônio da tireoide, na proteção contra doenças cardiovasculares, além de possíveis estresses oxidativos ou condições inflamatórias no organismo humano, as quais desempenham atividades antioxidantes capazes de reduzir peróxidos no corpo humano (RAYMAN, 2012).

Em contraste com muitos outros micronutrientes, a ingestão de Se varia, enormemente, em todo o mundo, encontrando-se ingestões deficientes e outras bem acima do ideal, atingindo concentrações tóxicas que provocam problemas respiratórios, perda de cabelo e unhas, distúrbios do sistema nervoso e na pele, problemas dentários e paralisias (JOHNSON; FORDYCE; RAYMAN, 2010). Além disso, Combs Junior (2001) relatou que o nível adequado de Se, em uma população, está altamente correlacionado ao conteúdo de Se nos alimentos consumidos.

Além dos inúmeros benefícios do Se para a saúde humana, a sua baixa ingestão também é diretamente relacionada a doenças conhecidas como Keshan e Kashin-Beck. A doença de Keshan, relatada com maior frequência em algumas regiões da Ásia, está relacionada com problemas cardíacos. Já a doença de Kashin-Beck é caracterizada por alterações patológicas das articulações e músculos em todo o corpo dos pacientes (XIONG et al., 2010).

As sociedades de nutrição Alemã, Austríaca e Suíça apresentaram, em fevereiro de 2015, uma nova edição dos "valores de referência para ingestão de nutrientes", em que constam valores de referência para a ingestão de Se (TABELA 2). Ressalta-se que a determinação dos valores de referência de Se tiveram como critério a saturação de selenoproteína no plasma sanguíneo (KIPP et al., 2015).

Tabela 2 - Valores estimados para a ingestão dietética de referência recomendada de selênio (RDI).

Idade	Selênio μg dia-1	
	Homem	Mulher
Bebês		
0 a 4 meses		10
4 a 12 meses		15
Crianças e Adolescentes		
1 a 4 anos		15
4 a 7 anos		20
7 a 10 anos		30
10 a 13 anos		45
13 a 15 anos		60
15 a 19 anos	70	60
Adultos		
19 a 25 anos	70	60
25 a 51 anos	70	60
51 a 65 anos	70	60
Acima de 65 anos	70	60
Mulheres grávidas		60
Mulheres em lactação		75

Fonte: adaptado de Kipp et al. (2015).

Considerando os valores reportados na Tabela 2, estudos realizados, em diversas áreas no mundo, mostram uma baixa ingestão de Se pela população em diferentes estágios da vida (ADAME et al., 2012; CHAN et al., 2012; HURST et al., 2013). No entanto a ingestão de selênio necessária, para otimizar a atividade das peroxidases da glutathione (GPx4) e proporcionar a concentração ideal de selenoproteína P (SEPP1) é, aproximadamente, $75 \mu\text{g}$ dia⁻¹ para humanos (XIA et al., 2010). No Brasil, estudos mostram que a ingestão diária de Se é amplamente variável, em função de fatores, como região de habitação, classe social e idade do indivíduo. Maihara et al. (2004), estudando a quantidade de Se ingerida por crianças dos estados de São Paulo e Amazônia, constataram que a dose diária de Se, ingerida na região Amazônia, foi maior que em São Paulo, chegando a presenciar valores acima do recomendado para crianças no Amazônia.

As principais fontes biodisponíveis de Se, para animais e humanos, são oriundas, de forma direta e/ou indireta, do Se contido em vegetais. Assim, problemas de saúde relacionados à deficiência de Se podem surgir pela distribuição variável deste elemento no solo e sua absorção moderada por algumas culturas (WINKEL et al., 2015). Apesar de ser considerado como um elemento essencial, o Se pode ser tóxico, para os seres humanos e animais, dependendo do seu nível de consumo. O seu efeito benéfico ocorre, em um pequeno

intervalo, sendo de 55-400 $\mu\text{g dia}^{-1}$ e, abaixo dessa faixa, o Se não pode desempenhar a sua função essencial no organismo e, acima dela, torna-se tóxico (MAIHARA et al., 2004).

A concentração proteica é um fator que também determina o conteúdo de Se nos alimentos. A selenometionina é predominante, em alimentos vegetais, como os cereais. As frutas cítricas e vegetais folhosos, por possuírem baixas concentrações proteicas, possuem menores teores de Se. Em alimentos de origem animal, como carnes, vísceras, peixes e frutos do mar, há predominância de selenocisteína (ALAEJOS; ROMERO; ROMERO, 2000). Assim, a quantidade de Se ingerida numa dieta é também determinada em função dos hábitos alimentares e poder aquisitivo da população (FERREIRA; GOMES; ROBERTO, 2002).

Grande parte da população mundial vive em regiões em que o solo apresenta um desbalanço mineral, o que pode caracterizar uma falta frequente de nutrientes essenciais, como ferro, zinco, cálcio, magnésio, cobre, iodo e o selênio na alimentação (MARTINEZ, 2013). O enriquecimento de solos, visando incremento de Se nos alimentos com este nutriente, em especial de vegetais e seus derivados, vem sendo o foco de trabalhos mais recentes. Hoje é necessário permitir que a população tenha acesso a uma dieta diversificada de alimentos aliada a suas características nutritivas melhoradas, principalmente, a partir do processo denominado biofortificação.

Uma adequada ingestão de Se é importante, independentemente da idade. Estudos mais recentes têm mostrado que a deficiência de Se pode contribuir, para o declínio cognitivo em pessoas idosas, além de haver uma associação com o estresse oxidativo observado em pacientes com Alzheimer e diabetes tipo 2 (CARDOSO et al., 2010; RAYMAN, 2012). Uma pesquisa realizada com o consumo de castanha-do-brasil (*Bertholetia excelsa*) comprovou efeitos benéficos na ingestão de Se, nesse caso, contra o mal de Alzheimer, verificando que o consumo de uma castanha-do-brasil por dia pode recuperar a deficiência de selênio, desse modo, observaram-se indícios de que o consumo desta castanha por idosos com CCL (Comprometimento Cognitivo Leve) pode ter efeitos positivos sobre as funções cognitivas, particularmente, na fluência verbal e na praxia construtiva (CARDOSO, 2014).

Em trabalho realizado na região Amazônica, Silva Júnior et al. (2017) demonstraram que a amêndoa da castanha-do-brasil é reconhecida no mundo inteiro como o alimento mais rico em selênio, caracterizando em diferentes teores e vem se tornando fundamental, à medida que cresce a importância do uso das amêndoas na alimentação, não somente das comunidades locais, como também para outros países, onde o seu valor nutricional e seu atual reconhecimento, como fonte rica em Se, atribuí-lhes um status como uma alternativa, para a suplementação da dieta, agregando valor à sua produção e comércio.

De uma maneira geral, os nutricionistas brasileiros recomendam a ingestão de uma única castanha por dia, mas também alertam que quantidades elevadas do mineral podem provocar intoxicação por selênio, ou selenose, causadora de perda de cabelo, fadiga, fraqueza das unhas, lesões na pele e problemas gastrointestinais.

O selênio, na dieta humana, tem como função agir como antioxidante, protegendo o tecido celular dos danos causados pelos radicais livres e apresenta papel ativo no sistema imunológico, reduzindo os riscos de infecções virais e é capaz de tornar mais lento o avanço do câncer. Por outro lado, a sua deficiência pode causar a diminuição da taxa de crescimento, distrofia muscular, anemia e hemorragia. Portanto há necessidade de conhecimento da suplementação adequada deste mineral na dieta, para proporcionar uma melhor utilização desse elemento.

2.4 Biofortificação de alimentos

A biofortificação de alimentos teve início, em 1993, pelo economista Howarth E. Bouis, do Instituto Internacional de Pesquisa sobre Políticas Alimentares (IFPRI), quando apresentou a um grupo de melhoristas de plantas a ideia de genótipos, visando a maiores teores de minerais e vitaminas na parte comestível dos alimentos. Desse modo, pode ser realizada, basicamente, de duas formas: a genética, que é obtida por melhoramento convencional ou engenharia genética e, ou agrônômica, por meio do uso de técnicas agrícolas no aporte suplementar do nutriente de interesse ao solo ou via foliar (CAKMAK, 2008).

A biofortificação faz sentido como parte de uma abordagem integrada de sistemas alimentares, para reduzir a desnutrição, e uma maneira sustentável e viável de alcançar pessoas com pouco acesso a mercados formais ou sistemas de saúde, é a introdução de cultivos biofortificados, variedades obtidas por melhoramento tradicional de modo a apresentar maiores conteúdos de minerais e vitaminas, no combate à desnutrição (NUTTI et al., 2007), portanto beneficia tanto as famílias de agricultores, que produzem para consumo próprio, assim como as famílias urbanas e rurais que compram alimentos biofortificados.

Os alimentos a serem biofortificados têm que se enquadrar em alguns critérios, tais como: serem consumidos por grande parte da população- alvo, pequena variação *per capita* no consumo semanal, boa aceitabilidade, boa disponibilidade do micronutriente no alimento, viabilidade econômica, dentre outros (RIOS et al., 2009). A biofortificação surgiu, em consequência da preocupação com o aumento dos índices de desnutrição no mundo e foi reforçada com a recente descoberta de que o melhoramento vegetal, voltado exclusivamente

para ganhos em produtividade, pode provocar a redução da concentração de minerais e vitaminas na parte comestível das culturas (MURPHY; REEVES; JONES, 2008).

De acordo com Welch e Graham (2000), os caminhos tomados pela agricultura, a partir da Revolução Verde, devem ser revistos. Problemas como a questão ambiental e a deficiência nutricional de grande parte da população mundial, sobretudo, a mais carente, devem ser solucionados. As consequências desses problemas afetam a saúde humana, o bem-estar e a produtividade. Contudo, em países mais pobres, o consumo de frutas, legumes e carnes é baixo, de forma que alternativas acessíveis à essa população devem ser disponibilizados, para eliminarem a deficiência dos principais micronutrientes; países desenvolvidos também sofrem com esse problema. Sendo assim, a biofortificação de alimentos seria uma solução para a desnutrição de micronutrientes para diversos países.

A biofortificação difere da fortificação convencional, à medida que a biofortificação visa aumentar os níveis de nutrientes nas culturas, durante o crescimento das plantas e não, por meio de meios manuais, durante o processamento dos alimentos. A biofortificação pode, portanto apresentar uma maneira de atingir populações, em que a suplementação e as atividades de fortificação convencionais podem ser difíceis de implementar e/ou limitadas, assim sendo uma maneira sustentável e viável no combate à desnutrição. Assim, a maior vantagem da biofortificação é o fato de não requerer mudanças, nos hábitos de produtores e consumidores. As mudanças no conteúdo dos produtos não necessariamente alteram a aparência, gosto, textura ou a forma de preparo do alimento.

Durante o processo de melhoramento genético, várias etapas são importantes para a obtenção de cultivares biofortificadas. A primeira etapa consiste em explorar a variabilidade existente em Bancos de Germoplasma, a fim de reconhecer o potencial daquela espécie para as futuras etapas do processo de melhoramento. Vários autores apontam que, em longo prazo, a estratégia de biofortificação, via melhoramento genético, é mais viável e eficiente (BOUIS, 2003; GIBSON, 2012; RIBEIRO, 2010; RÍOS et al., 2009).

A técnica de biofortificação com Se consiste, basicamente, no aumento da concentração desse elemento em culturas agrícolas pela sua introdução, na adubação das plantas ou por melhoramento genético, visando atender à necessidade humana ou animal (RÍOS et al., 2008). Nesse sentido, Chen et al. (2002), para a cultura do arroz; Ríos et al. (2008), para alface e Stroud et al. (2010) para trigo demonstraram que o teor de Se, nessas culturas, aumentou com a introdução desse elemento na adubação, garantindo, por conseguinte, maior ingestão de Se pela população.

A biofortificação mostrou-se eficiente, em trabalho realizado por Figueiredo et al. (2017), como estratégia para aumentar a concentração de Zn e Se na cultura. Essa fertilização aumentou os teores de Se e Zn, nas sementes de feijão, logo os autores concluíram que o feijão pode ser biofortificado com Zn e Se sem afetar a biodisponibilidade do Fe.

Boldrin et al. (2012) observaram o efeito da aplicação de Se, para a produção de grãos, nas plantas de arroz, baseados na forma de aplicação, sendo que a dose de $0,75 \text{ mg/ dm}^{-3}$ de Se no solo causou incremento de 13% na produção de grãos, quando se utilizou o Se na forma de selenato e selenito. Este aumento, na produção de grãos, deve-se ao efeito protetor do Se, por aumentar a atividade antioxidante, causar a ativação da enzima catalase e a redução da peroxidação lipídica (HARTIKAINEN; XUE; PIIRONEN, 2000; RAMOS et al., 2011; SAIDI; CHTOUROU; DJEBALI, 2014).

Chilimba et al. (2009) obtiveram resultados significativos, quando aplicaram Se no solo para a cultura do milho; na dose de 100 g Se ha^{-1} de selenato de sódio no solo obtiveram aumentos de até $1,6 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se nos grãos. Sharma et al. (2009), trabalhando com canola adubada com duas fontes de Se (selenito e selenato), em doses variando de 0 a 4 mg kg^{-1} , conseguiram até $214,5 \text{ mg Se kg}^{-1}$ nas sementes. Ríos et al. (2010), testando fontes e concentração de Se em plantas de alface, verificaram diminuição nos níveis de N-NO_3^- com aumento da concentração de Se aplicado, melhorando significativamente a NUE (Uso eficiente do Nitrogênio) e, por isso, a produção agrícola dessa cultura.

Nesse sentido, a biofortificação das plantas com Se, por meio da sua introdução juntamente com a adubação nas culturas, aliada ao melhoramento genético, seja por meio da seleção de genótipos ou na transferência de genes, tem mostrado ser uma técnica útil para a ingestão desse elemento em humanos e animais. Nessa perspectiva, algumas iniciativas têm sido realizadas, no Brasil e no mundo, para fazer com que a biofortificação alcance seu potencial no fornecimento de nutrientes.

Os programas HarvestPlus e Rede Biofort são organizações que desenvolvem e promovem novas variedades de plantas mais nutritivas, em colheitas de alimentos básicos, e o programa HarvestZinc objetiva estudar a viabilidade da estratégia de fertilizantes com uma estratégia de biofortificação que objetiva aumentar os teores de micronutrientes. Os alvos dos programas são os elementos Zinco, Ferro, Vitamina A, Selênio e o Iodo, identificados como mais carentes nas populações em dietas globais.

O programa HarvestPlus é uma aliança mundial de instituições de pesquisa e de entidades executoras, dentre elas, o CIAT e IFPRI, que se uniram, para melhorar e disseminar produtos agrícolas que contribuam, para uma melhor nutrição, redução da fome e fome oculta,

portanto age em escala global, para melhorar a segurança nutricional, por meio do desenvolvimento e implantação de produtos alimentares básicos ricos em vitaminas e minerais e fornecer micronutrientes a bilhões de pessoas diretamente por meio dos alimentos básicos que as pessoas consomem. Dentre tais alimentos, estão arroz, trigo, mandioca, feijão, milho e batata-doce, que são enriquecidos com Vitamina A, ferro e zinco. O HarvestPlus atua, na África, Ásia e América Latina e conta com parcerias entre o setor público e a iniciativa privada, com o intuito de atingir o maior número possível de populações carentes. Este programa é financiado pelo Banco Mundial e fundação Bill & Melinda Gates (HARVESTPLUS, 2019).

O projeto HarvestZinc Fertilizer está em andamento no programa HarvestPlus, atualmente, está na sua 4ª fase, desse modo, realizando testes em fertilizantes recém-desenvolvidos, contendo os micronutrientes supracitados, sendo assim objetivando melhorar as concentrações desses nutrientes em trigo, arroz e milho cultivados em diferentes regiões do globo terrestre. O projeto tem demonstrado sucesso em suas abordagens e conta com novos desafios. Dentre os objetivos e produção de novos resultados e insights de relevância, o projeto demonstra importância prática, os resultados revelam a viabilidade de estratégias de fertilizantes e seu vasto potencial no alívio de deficiências de micronutrientes e impacto positivo na saúde humana. A 3ª fase demonstrou o grande potencial da estratégia de fertilização foliar no incremento dos teores de micronutrientes nas culturas (HARVESTZINC, 2019). O projeto conta com a parceria e colaboração da Universidade Federal de Lavras, em estreita parceria com a EPAMIG, para a condução das unidades experimentais em diversas localidades.

A Rede BioFORT é coordenada pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), congrega diversos projetos de biofortificação de alimentos no Brasil, visando à segurança nutricional da população brasileira, tendo o foco direcionado ao melhoramento genético das principais culturas, para a alimentação básica da dieta do brasileiro, como arroz, feijão, feijão-caupi, mandioca, batata-doce, milho, abóbora e trigo. Ademais, esta rede visa à transferência de tecnologia para as comunidades locais e escolas públicas (BIOFORT, 2019).

2.5 Estratégias de melhoramento aplicadas à biofortificação do arroz

O melhoramento genético de plantas é uma das bases, para suprir a demanda de alimentos, e o aumento exponencial da população é um dos grandes desafios da agricultura moderna. O sucesso do processo depende do uso de tecnologia, acesso a recursos, gestão, investimento, características do mercado e apoio em nível governamental. Com isso, considerando que os agricultores planejem suas metas com a sustentabilidade, envolve conservar e proteger os recursos naturais, fornecendo alimentos, fibras e combustível, para uma população em crescimento, tudo de uma maneira financeiramente viável para produtores e consumidores.

Ademais, nos dias atuais, existe grande preocupação dos programas de melhoramento de plantas de incrementar uma alta produtividade correlacionada com alimentos com melhores teores de nutrientes, sendo que a maioria dos alimentos apresenta baixo teor nutritivo, particularmente, no que diz respeito a micronutrientes (CAKMAK et al., 2017).

Os programas de melhoramento genético de arroz têm como objetivo o desenvolvimento de genótipos superiores pelo emprego de diferentes estratégias de melhoramento. Dentre eles, destacam-se a seleção do germoplasma, para a diversidade genética disponível, a introdução de cultivares e linhagens, seleção de plantas individuais ou linhas puras e a hibridação com posterior condução e seleção, em populações segregantes, seleção recorrente, retrocruzamentos e, mais atualmente, o emprego da transgenia e edição genômica. Desta forma, as culturas biofortificadas podem ser desenvolvidas por métodos tradicionais de melhoramento, sendo necessário que haja uma variação genética suficiente, nas populações das culturas, para as características, visando à qualidade nutricional, como o alto teor de betacaroteno e outros nutrientes essenciais (FONCECA et al., 2008).

Na ausência de variabilidade genética, para os nutrientes em questão, a biotecnologia surge como uma alternativa pela sua capacidade de identificar e caracterizar os genes, bem como suas funções, na expressão e regulação gênica. Com o advento dos eventos transgênicos e, atualmente, da edição genômica, é possível identificar esses alelos responsáveis pela maior eficiência na absorção e translocação de nutrientes. Esses alelos podem ser inseridos em culturas agrícolas de importância na alimentação. Um fato importante é que o sequenciamento do genoma da subespécie de arroz japônica revelou a existência de alta homologia com outros cereais (GOFF et al., 2002).

As principais pesquisas, para melhorar as concentrações de nutrientes e vitaminas, nos grãos de arroz, visam ao aumento de vitamina A, em virtude da prevalência da deficiência que

atinge milhões de pessoas e seus efeitos na saúde. As pesquisas levaram à obtenção do *Golden rice*, o arroz dourado, uma variedade produzida, por meio de engenharia genética, para biossintetizar o betacaroteno, um precursor da vitamina A, nas partes comestíveis de arroz. O arroz dourado difere do arroz padrão pela inserção de três transgenes. Os pesquisadores avaliaram a expressão no arroz de enzimas importantes na biossíntese da pró-vitamina A, como fitoeno sintase do milho ou de *Narcissus pseudonarcissus*, caroteno desaturase de *Erwinia uredovora* e licopeno β -ciclase de *Narcissus pseudonarcissus* (BEYER et al., 2002; PAINE et al., 2005). O arroz dourado foi, posteriormente cruzado, em variedades locais de arroz, utilizando métodos convencionais de melhoramento. Recentemente, o Canadá, a Austrália, a Nova Zelândia e os Estados Unidos aprovaram o arroz dourado para o cultivo. Embora essas variedades transgênicas tenham um tremendo potencial nutricional, a liberação para os agricultores depende da aprovação por meio de processos nacionais de biossegurança e regulamentação (CIB, 2018).

O enriquecimento com algum tipo de nutriente ou vitamina, por meio do melhoramento genético ou da engenharia genética, tem sido uma alternativa com perspectivas sustentáveis para alimentos que fazem parte da dieta básica das populações. As estratégias do melhoramento de plantas, para controlar as deficiências nutricionais, em consequência de uma má alimentação, incluem aumentar as concentrações de determinado elemento, nas partes comestíveis das plantas, ao considerar a redução dos compostos antinutricionais presente nos vegetais, como o ácido fítico, certos taninos e metais pesados e aumento de substâncias promotoras, como certos ácidos orgânicos e outros nutrientes, em uma etapa de seleção de um programa de melhoramento.

Por exemplo, o arroz transgênico, para incremento nos teores de ferro e zinco, foi desenvolvido e testado, em ensaios de campo confinados, que podem fornecer 30% da ingestão diária recomendada para ambos os nutrientes. As populações foram geradas para superexpressar constitutivamente os genes *OsNAS*, particularmente, o *OsNAS2*, que apresentam um enorme potencial para a biofortificação de Fe e Zn do endosperma de arroz (JOHNSON et al., 2011; TRIJATMIKO; DUENAS, 2016). Entretanto o melhoramento convencional, em vez da reprodução transgênica, é usado, em todas as culturas liberadas, em programas voltados, para a biofortificação, como no caso do HarvestPlus. Portanto o cultivo convencional não enfrenta os mesmos obstáculos regulatórios e é amplamente aceito.

Para a cultura do arroz, a rede Biofort obteve, por meio de melhoramento de cultivares, aproximadamente, 50% mais zinco e 100% mais ferro, em comparação com a média do arroz branco polido convencional (BIOFORT, 2019). Fang et al. (2008), em estudo

sobre o efeito da adubação foliar com a cultura do arroz com zinco (Zn), ferro (Fe) e selênio (Se), realizado na China, demonstraram que, em ótimas condições de cultivo, os teores desses nutrientes podem ser incrementados em até 36,7%, 194% e 37,1%, respectivamente, nos grãos, evidenciando a importância de se realizar experimento em condições próprias de cultivo.

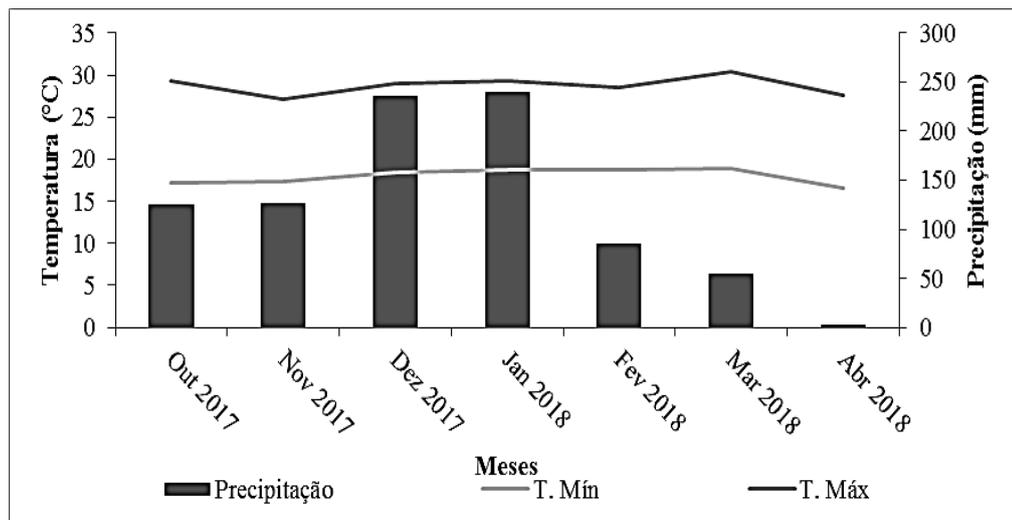
Dessa forma, os critérios de biofortificação mais importantes, para a seleção de genótipos, são: manutenção ou aumento da produtividade das culturas e o maior rendimento das culturas para garantir a aceitação generalizada do produtor; a característica de aumento dos níveis de nutriente deve ser estável, em diferentes ambientes e condições de cultivo; os nutrientes devem estar biodisponíveis sob condições tradicionais de cultivo e as culturas biofortificadas serem aceitas pelos produtores e consumidores.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos em dois ambientes, nas unidades experimentais situadas no campus da Universidade Federal de Lavras - UFLA – na Área experimental no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária (Fazenda Muquém) e na Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG, ambos localizados na cidade de Lavras a uma altitude de 918 m, 21°14' de latitude sul e 45°00' de longitude oeste. O clima da região é classificado como subtropical úmido, com temperatura média de 19,4°C, precipitação média anual de 1529,7 mm. Os dados de climatologia da cidade de Lavras/MG estão representados na Figura 2.

Figura 2 - Variações mensais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, no período de outubro a abril da safra 2017/2018, na cidade de Lavras - MG.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2018).

Anteriormente à instalação dos experimentos, foram coletadas amostras de solo, na profundidade de 0 – 20 cm, para a análise das propriedades físicas e químicas do solo é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades químicas e físicas do solo antes da instalação dos experimentos.

Propriedades do solo (0-20 cm)	AMBIENTE	
	EPAMIG	UFLA
pH (em água)	6,2	5,8
P (mg dm ⁻³)	1,85	42,62
K (mg dm ⁻³)	95	155,62
Ca (cmol _c dm ⁻³)	9,00	3,01
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,00	0,84
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,04	0,11
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,29	3,82
SB (cmol _c dm ⁻³)	10,24	4,25
CTC - t (cmol _c dm ⁻³)	10,28	4,36
CTC - T (cmol _c dm ⁻³)	12,53	8,07
m(%)	0,39	2,52
V(%)	81,72	52,65
M.O (dag kg ⁻¹)	4,49	2,37
P-Rem (mg L ⁻¹)	11,58	28,26
S (mg dm ⁻³)	2,54	7,19
Zn (mg dm ⁻³)	4,40	4,88
Cu (mg dm ⁻³)	3,30	0,25
Fe (mg dm ⁻³)	278,50	53,52
Mn (mg dm ⁻³)	154,00	13,40
B (mg dm ⁻³)	0,35	0,03
Argila (%)	39	56
Silte (%)	24	5
Areia (%)	37	39

Fonte: Do autor (2019).

SB: Soma de Bases; MO: Matéria Orgânica; P-Rem: Fósforo remanescente; m(%): saturação de alumínio no solo; V(%): saturação por base do solo; CTC (t): capacidade de troca de cátions efetiva; CTC(T): capacidade de troca de cátions total. Fonte: Laboratório de Análise de Solos – UFLA.

3.2 Genótipos

Foram avaliados 20 genótipos, pertencentes ao ensaio de Valor de Cultivo e Uso (VCU), conduzidos nos anos agrícolas 2017/18 (TABELA 3), oriundos do programa de melhoramento genético de arroz de terras altas do convênio entre a Universidade Federal de Lavras (UFLA), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e Embrapa Arroz e Feijão.

Tabela 4 - Linhagens do programa de melhoramento genético de arroz de terras da UFPA, em parceria com a Embrapa Arroz e Feijão e Epamig, que foram avaliadas na safra 2017/18.

Identificação	Safra 2017/2018
1	CMG F6 LAM 20-2
2	CMG ERF 85-14
3	BRS Esmeralda
4	CMG ERF 221-16
5	CMG 2119
6	BRSMG Caçula
7	CMG ERF 85-6
8	CMG 2187
9	CMG 2188
10	CMG 2085
11	CMG ERF 85-15
12	CMG 221-4
13	CMG F6 LAV 1-7
14	CMG ERF 221-7
15	CMG 1896
16	CMG ERF 221-9
17	CMG ERF 221-19
18	CMG ERF 221-29
19	CMG ERF 85-13
20	Multilinha

Fonte: Do autor (2019).

3.3 Plano experimental e condução dos experimentos

O experimento foi conduzido, na safra 2017/18, com plantio realizado em novembro de 2017 e colheita em março de 2018; o delineamento empregado foi o de blocos casualizados com três repetições em parcelas subdivididas. As parcelas experimentais foram constituídas por cinco linhas de 4,0 m espaçadas em 0,40 m e densidade de semeadura de 80 sementes/metro nos ambientes de Lavras/MG e EPAMIG/Subestação.

Utilizou-se a semeadura direta, e o manejo foi semelhante ao adotado para o plantio comercial na região, sendo irrigado, quando necessário, por meio do sistema de aspersão. Na condução do experimento, foi preparado o adubo, composto pela incorporação do nutriente selênio na ureia, visando à sua acumulação pela planta de arroz, portanto avaliando a biofortificação agrônômica.

A adubação do composto incorporado do selênio na ureia foi realizada, via cobertura nitrogenada em, aproximadamente, 45 dias, após semeadura, nas duas linhas laterais da parcela experimental (bordadura) na dose de 100 kg ureia ha⁻¹. Nas três linhas centrais da parcela, foi realizada a adubação via cobertura nitrogenada normalmente com ureia. No experimento, foi aplicado o selenato de sódio (Na₂SeO₄), reagente sigma-aldrich.

A incorporação do selênio na ureia foi executada em laboratório, para se obter a concentração de 800 ppm na mistura; foram realizados os cálculos estequiométricos da massa atômica do selênio de 78.96 g mol^{-1} sobre a massa molecular do selenato de sódio de $188,98 \text{ g mol}^{-1}$. O composto foi obtido da mistura manual da ureia com selênio, a qual foi preparada com auxílio de solvente orgânico dietanolamina (aderente) em, aproximadamente, 1 grama para cada kg de ureia e 5 gotas do corante orgânico, para facilitar a visualização do processo e avaliação da homogeneidade que foi obtida durante a adição de Se ao grânulo de ureia.

No estágio de maturação dos grãos, foi realizada, separadamente, a colheita de cada parcela das plantas da área sem selênio, constituída pelos quatro metros das três fileiras internas ($4,8 \text{ m}^2$) e das duas linhas laterais adubadas com selênio incorporado na ureia ($3,2 \text{ m}^2$).

3.4 Características Avaliadas

Durante a condução dos experimentos, foram avaliadas as características:

- a) **Altura de plantas (cm):** média de cinco plantas da parcela, medida com régua graduada do solo à extremidade da panícula mais alta;
- b) **Produtividade de grãos (kg ha^{-1}):** extrapolação do peso dos grãos da parcela inteira após colheita e secagem para 13% de umidade;
- c) **Peso de 1000 grãos (gramas):** foram coletadas, aleatoriamente, 8 amostras de 100 grãos as quais foram, posteriormente, pesadas em balança de precisão, segundo as normas da BRASIL - RAS (BRASIL, 2009). Das 8 amostras obtidas, realizou-se uma média e depois foi multiplicada pelo fator 10 para obter a massa de 1000 grãos;
- d) **Renda e rendimento de grãos inteiros (%):** no processo de beneficiamento do arroz, a estimativa da porcentagem de arroz beneficiado (limpo), resultante da retirada da casca e impurezas, é denominada renda. Já dentro deste valor, ao separá-los em grãos inteiros e quebrados resultantes do benefício dos grãos de arroz, o rendimento foi a porcentagem final de grãos inteiros;
- e) **Teor de selênio na semente e parte aérea:** foi avaliado segundo a metodologia da análise de elementos-traço (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 2007).

3.5 Análise de Selênio no tecido vegetal (USEPA 3051A)

A metodologia de extração desses micronutrientes utilizada foi a 3051A, proposta pela USEPA (2007). O método de análise de selênio, após o desenvolvimento completo da planta de arroz, foi analisado da seguinte forma: aproximadamente, 0,4 g de amostra vegetal e grãos foram pesados e digeridos com 4 mL de $\text{HNO}_3 \geq 65\%$ concentrado, em frascos de Teflon[®] PTFE, à pressão de 0,76 Mpa, durante 15 minutos, em forno de micro-ondas, marca CEM, modelo Mars 5. A temperatura alcançada a esta pressão é de, aproximadamente, 175°C. No extrato obtido, foram adicionados mais 4 mL de água bidestilada cujo extrato foi, posteriormente filtrado, para se proceder à análise multielementar, baseada na metodologia descrita pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007). Esse método é considerado o procedimento oficial dos EUA para a determinação de elementos-traço em solos, adubos e outros materiais. Os teores de Se na solução digerida foram determinados pela espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Ademais, foi utilizado padrão certificado White Clover (BCR402, Institute for Reference Materials and Measurements, Geel, Bélgica), com concentração conhecida de Se ($6,7 \text{ mg kg}^{-1}$), o qual juntamente com o Branco foi inserido, em cada bateria de digestão, para garantia e controle de qualidade dos resultados analíticos. A recuperação média do padrão de referência utilizado nas leituras foi de 107%.

Após a colheita, foram avaliadas as características experimentais supracitadas. Depois da secagem, uma amostra de 10 gramas de material vegetal por parcela experimental foi moída com um moinho de mão para posterior digestão. Portanto, para a determinação dos teores de Se, na parte aérea e nas amostras de grãos de arroz, foram submetidos à mesma metodologia da USEPA 3051A, descrita anteriormente. Além disso, partes das amostras de grãos de arroz obtidas foram submetidas ao processamento industrial (polimento) para a avaliação dos teores de Se. O processo de polimento ou brunimento consiste na retirada do farelo do arroz. Em síntese, uma alíquota dos grãos de arroz é beneficiada em engenho de provas, para a retirada da casca, mantendo parte dela em grão integral e a outra parte para ser polida, durante dois minutos no engenho de provas, para a retirada da camada de aleurona (farelo), obtendo-se grãos polidos.

3.6 Cálculo dos limites de detecção e quantificação

Os limites de detecção e quantificação (LOD e LOQ) foram estabelecidos, usando 10 extratos em branco, seguindo o procedimento geral. Os valores foram calculados com três e 10 vezes o desvio padrão (LOD e LOQ, respectivamente) das 10 soluções em branco preparadas, individualmente, para a análise dos grãos (KHAN et al., 2013; SILVA JÚNIOR et al., 2017). Para a análise em grãos comuns, o LOD (μg de Se kg^{-1} de extrato) foi de 5,06 (LOQ de 16,86 μg kg^{-1}). Os LOD's dos métodos analíticos utilizados para grãos de arroz (μg de Se kg^{-1} amostra DW) foram de 441,92 μg kg^{-1} .

Tabela 5 - Resultado da digestão do fertilizante nitrogenado enriquecido com Se utilizado na cobertura.

Materiais digeridos	Resultado esperado (mg kg^{-1})	Resultados em ICP-OES ^a (mg kg^{-1})
Ureia enriquecida com Se	800,000	849,260
Ureia	0	<LQ ^b

Fonte: Do autor (2019).

^a Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES); ^b O fertilizante nitrogenado de ureia foi omitido porque não contém o selenato de sódio (selênio).

3.7 Análise estatística

Após a coleta dos dados, foram atendidos os pressupostos de normalidade, independência dos erros e homogeneidade das variâncias do erro, sendo assim foram realizadas as análises de variâncias individuais e conjuntas (COCHRAN; COX, 1957). As médias dos tratamentos foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5% de probabilidade por meio do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018) e software Sisvar 5.6 (build 86) (FERREIRA, 2015).

As análises de variância individual foram realizadas, considerando a parcela subdividida no espaço: em cada parcela há uma subdivisão de áreas em subáreas, constituindo cada uma delas uma subparcela (com ou sem a adubação em cobertura nitrogenada com ureia enriquecida com selênio). O seguinte modelo estatístico foi empregado:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + b_k + (gb_{ik}) + s_j + gs_{ij} + e_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijk} : observação referente à linhagem i , no bloco k e do tratamento com ou sem selênio j ;

μ : constante associada às observações (média geral);

g_i : efeito fixo da linhagem i ($i = 1, 2, \dots, 20$);

b_k : efeito fixo do bloco k ($k = 1, 2, 3$);

(gb_{ik}) : efeito do conjunto da i -ésima linhagem e do k -ésimo bloco (erro A);

s_j : efeito fixo do tratamento com selênio j (subparcela com ou sem a adubação da ureia enriquecida com selênio);

gs_{ij} : efeito fixo da interação do i -ésimo linhagem com o selênio j ;

e_{ijk} : efeito aleatório do erro experimental associado à observação, sendo $e_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2)$.

Posteriormente foi realizada a análise conjunta com emprego de parcela, subdividida no espaço, envolvendo a posição da colheita (subárea com e sem selênio incorporado na ureia), as linhagens e os dois ambientes para verificar se havia diferença significativa entre acumulação de Se pelas linhagens, empregando a metodologia apresentada por Ramalho et al. (2012). O modelo estatístico da análise de variância conjunta foi:

$$Y_{ijkl} = \mu + g_i + b_{k(l)} + a_l + (ga)_{il} + (gb)_{ik(l)} + s_j + (gs)_{ij} + (sa)_{jl} + (gsa)_{ijl} + e_{ijkl}$$

Em que:

Y_{ijkl} : valor observado na parcela que recebeu a linhagem i , na repetição k , dentro do tratamento com ou sem selênio j , no local l ;

μ : constante associada às observações (média geral);

g_i : efeito fixo da linhagem i ($i = 1, 2, \dots, 20$);

$b_{k(l)}$: efeito da repetição k , no ambiente l ;

s_j : efeito fixo do selênio j (subparcela com ou sem a adubação da ureia enriquecida com selênio);

a_l : efeito fixo do ambiente l ($l = 1, 2$);

$(gb)_{ik(l)}$: efeito do conjunto do i -ésimo linhagem e do k -ésimo bloco, no ambiente l (erro A);

ga_{il} : efeito da interação entre as linhagens i e os ambientes l ;

$(gs)_{ij}$: efeito da interação entre as linhagens i e o selênio j ;

(as) l_j : efeito da interação entre os ambientes l e o selênio j ;

(gas) ilj : efeito da interação entre as linhagens i , os ambientes l e o selênio j ;

e_{ijkl} : efeito do erro experimental associado à observação, sendo $e_{ijkl} \sim N(0, \sigma_e^2)$.

Contudo as análises de variância individual das características teor de selênio, nos grãos e parte aérea, foram realizadas, considerando a parcela em blocos casualizados, para cada um dos ambientes. O seguinte modelo estatístico foi empregado:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + b_k + e_{ik}$$

Em que:

Y_{ik} : observação referente à linhagem i , no bloco j ;

μ : constante associada às observações (média geral);

g_i : efeito fixo da linhagem i ($i = 1, 2, \dots, 20$);

b_k : efeito do bloco k ($k = 1, 2, 3$);

e_{ik} é o efeito do erro experimental associado à observação, sendo $e_{ik} \sim N(0, \sigma_e^2)$.

Posteriormente foi realizada a análise conjunta, envolvendo os dois ambientes com a aplicação de selênio, para avaliar as características teor de selênio, nos grãos e parte aérea, de acordo com o modelo estatístico:

$$Y_{ikl} = \mu + g_i + b_{k(l)} + a_l + ga_{il} + e_{ikl}$$

Em que:

Y_{ikl} : observação referente à linhagem i , no bloco k , no local l ;

μ : constante associada às observações (média geral);

g_i : efeito fixo da linhagem i ($i = 1, 2, \dots, 20$);

$b_{k(l)}$ é o efeito da repetição k , dentro do ambiente l ,

a_l : efeito do ambiente l ($l = 1, 2$);

ga_{il} : efeito da interação entre as linhagens i e os ambientes l ;

e_{ikl} é o efeito do erro experimental associado à observação, sendo $e_{ikl} \sim N(0, \sigma_e^2)$

Ainda foi estimado o coeficiente de variação experimental (CV), para cada caráter avaliado em porcentagem (RESENDE; DUARTE, 2007).

$$CV (\%) = \frac{\sqrt{QME}}{\bar{x}} \times 100$$

Em que:

QME: Quadrado Médio do Erro;

\bar{x} : Média dos tratamentos avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo das análises individuais, envolvendo os ambientes para as características avaliadas, é representado na Tabela 6. Vale ressaltar que foram caracterizadas as parcelas com relação à posição da subparcela com ou sem aplicação do selênio incorporado na ureia.

Em experimentos implantados no esquema de parcela subdividida, há dois resíduos distintos: erro A (parcelas) e erro B (subparcelas dentro de parcelas). Assim como o tratamento de maior interesse foi disposto na subparcelas, espera-se que o erro experimental nelas seja menor, pois o grau de liberdade do erro B é maior do que o grau de liberdade do erro A, quando se utiliza o coeficiente de variação (CV%) como medida de precisão experimental.

Do ponto de vista fenotípico, ou seja, da condução do experimento em campo, o CV% é comumente empregado. Pimentel-Gomes (2009) destaca que os CV% inferiores ou iguais a 10% são considerados baixos, portanto um ótimo indicativo de qualidade experimental. Por sua vez, um experimento com CV% entre 10 e 20% é considerado médio ou de boa qualidade, é considerado regular de 20 a 30% e ruim ou baixa qualidade, quando a estimativa do coeficiente de variação for maior do que 30%. No presente trabalho, o CV (a) foi inferior ao CV (b), com valores menores que 20%, na maioria dos caracteres avaliados, em ambos os ambientes, indicando uma boa qualidade experimental. As estimativas, para os caracteres produtividade de grãos e rendimento de grãos inteiros, em ambos os ambientes, foram superiores a 10% e apenas o caráter rendimento de grãos inteiros na EPAMIG e UFLA apresentou o CV% de baixa precisão. Esse fato é justificado pelos caracteres produtividade e rendimento de grãos inteiros serem controlados por muitos genes, sendo assim denominados de poligênicos, ou quantitativos. Esses caracteres são altamente influenciados pela manifestação do ambiente na expressão do fenótipo.

Tabela 6 - Resumo das análises de variâncias individuais, considerando os dois ambientes, para as características analisadas: altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha^{-1}).

EPAMIG – SUBESTAÇÃO						
FV	GL	QM				
		Altura	PMG	Renda	Rendimento	Produtividade
Bloco	2	1247,16*	2,11	2,95	237,82*	614780,38
Genótipos (G)	19	211,18*	54,65*	7,74*	59,86*	1804205,25*
Erro A	38	96,68	3,13	2,29	22,79	407768,70
Selênio (Se)	1	50,70	9,51*	13,40*	39881,04*	205,14
G x Se	19	26,50	2,14	1,14	393,42*	450257,06
Erro B	40	16,71	1,35	1,26	205,41	354995,83
Média		111,93	27,89	71,40	51,83	4800,26
CV (a) (%)		8,78	6,34	2,12	9,21	13,30
CV (b) (%)		3,65	4,16	1,57	27,65	12,41

UFLA						
FV	GL	QM				
		Altura	PMG	Renda	Rendimento	Produtividade
Bloco	2	193,53*	23,12*	6,79	92,63	4581722,25*
Genótipos (G)	19	117,96*	24,92*	13,68*	1163,67*	840125,97*
Erro A	38	17,44	1,52	6,40	257,57	179613,30
Selênio (Se)	1	22,53	5,43*	0,33	250,68*	23,52
G x Se	19	5,13	0,81	6,26	22,40	92290,34
Erro B	40	7,08	1,20	4,94	29,64	87716,80
Média		69,00	25,93	69,78	45,16	1697,84
CV (a) (%)		6,05	4,76	3,63	35,53	24,96
CV (b) (%)		3,85	4,23	3,19	12,05	17,44

Fonte: Do autor (2019).

*significativo ($p < 0,05$) pelo teste F.

A aplicação ou não de selênio incorporado na ureia influenciou na expressão fenotípica de todas as características no ambiente EPAMIG. Porém, no ambiente UFLA, a fonte de variação Se influenciou o peso de mil grãos (PMG) e o rendimento de grãos inteiros, não interferindo na altura, renda e produtividade.

No que se refere às médias dos caracteres avaliados (TABELA 7), pode-se notar, no caráter rendimento de grãos inteiros, em ambos os ambientes, do caráter renda na EPAMIG e do caráter PMG na UFLA, uma relação mais favorável nas subparcelas com a aplicação do selênio incorporado na ureia. Dentre os outros caracteres, não foi observada diferença significativa com a presença do micronutriente selênio. Contudo essa diferença de rendimento de grãos inteiros avaliados na EPAMIG e UFLA quanto à subparcela, com aplicação de selênio incorporado na ureia, pode ser justificada pela época de colheita com grau de umidade médio dos grãos inferiores a 20%, reduzindo o percentual de grãos inteiros no ambiente UFLA (TELÓ et al., 2011), sendo que as recomendações para a cultura preconizam que os

maiores rendimentos de grãos inteiros são obtidos quando a colheita é realizada com umidade em torno de 20% (RIBEIRO et al., 2004).

Tabela 7 - Médias dos caracteres altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha^{-1}), com relação à subparcela, com ou sem selênio incorporado na ureia, nos dois ambientes avaliados.

Características	EPAMIG				UFLA			
	C/Se		S/Se		C/Se		S/Se	
Altura de Plantas	111,28	a	112,58	a	68,57	a	69,43	a
PMG	27,61	b	28,17	a	26,14	a	25,71	b
Renda	71,73	a	71,06	b	69,73	a	69,83	a
Rendimento	70,06	a	33,60	b	46,61	a	43,72	b
Produtividade de grãos	4801,57	a	4798,96	a	1698,28	a	1697,40	a

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas linhas pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Observou-se diferença significativa pelo teste F entre os genótipos, em todos os caracteres avaliados, em ambos os ambientes. As variações existentes para o mesmo caráter, em ambientes diferentes, são em decorrência das condições existentes naquele local que favoreceram ou não a expressão do caráter. O progresso com a seleção, em um programa de melhoramento de plantas, para qualquer característica, está condicionado à existência de variabilidade genética entre os genótipos avaliados, sendo condição básica para o sucesso do programa, assim como a capacidade do melhorista ao visualizar e selecionar genótipos superiores na tomada de decisão.

O caráter rendimento de grãos inteiros na EPAMIG foi influenciado pela interação dos genótipos e do selênio na subparcela. Na análise do desdobramento da interação, nota-se maior porcentagem de rendimento de grãos inteiros, quanto à subparcela com a aplicação da ureia enriquecida com o micronutriente selênio (TABELA 8).

Tabela 8 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função da interação genótipos com a fonte de variação selênio da subparcela, na análise individual na EPAMIG.

Genótipos	Rendimento de grãos inteiros	
	Com Se	Sem Se
CMG F6 LAM 20-2	56,58 aA	47,44 aA
CMG ERF 85-14	75,47 aA	21,62 bB
BRS Esmeralda	65,12 aA	24,51 bB
CMG ERF 221-16	58,43 aA	37,52 aA
CMG 2119	77,20 aA	25,79 bB
BRSMG Caçula	84,93 aA	16,32 bB
CMG ERF 85-6	72,96 aA	38,50 aB
CMG 2187	66,85 aA	39,96 aB
CMG 2188	53,80 aA	40,07 aA
CMG 2085	71,58 aA	28,97 bB
CMG ERF 85-15	83,16 aA	20,51 bB
CMG 221-4	69,20 aA	37,63 aB
CMG F6 LAV 1-7	73,09 aA	36,69 aB
CMG ERF 221-7	68,03 aA	40,83 aB
CMG 1896	76,32 aA	24,74 bB
CMG ERF 221-9	74,83 aA	39,93 bB
CMG ERF 221-19	66,95 aA	42,75 bB
CMG ERF 221-29	58,23 aA	43,36 bA
CMG ERF 85-13	75,81 aA	28,10 aB
Multilinha	72,55 aA	36,67 bB

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna pertencem ao mesmo grupo, de acordo com o teste de Scott-Knott (1974), realizado a 5% de probabilidade.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha com relação à adubação de Se, dentro de cada genótipo, pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Existem várias estratégias, para aumentar a quantidade de nutrientes, na alimentação diária de populações carentes e uma delas é por meio de alimentos biofortificados. A biofortificação é promovida, com base na identificação de genótipos com elevados teores de micronutrientes essenciais, dentre eles o selênio, nos quais se avalia o desempenho em cruzamentos superiores, ou seja, genótipos que possuem uma alta capacidade a extrair quantidade de minerais em níveis suficientes e adequados para as necessidades humanas (CAKMAK et al., 2017).

Com relação aos caracteres teores de Se, nos grãos e parte aérea de arroz, observa-se que houve diferença significativa pelo teste F, em ambos os ambientes (TABELA 9), para acúmulo do micronutriente selênio no grão e parte aérea. Carvalho et al. (2019) demonstraram em estudos que as concentrações de Se, em solos do cerrado, variaram de 22 a 72 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Em

geral, os solos do Cerrado apresentam concentrações naturais de Se deficientes. Entretanto os solos com baixos teores de determinados micronutrientes podem ser corrigidos por meio da estratégia de aplicação de fertilizantes (CAKMAK, 2008).

Desse modo, na subparcela em que se aplicou a ureia, normalmente, sem incorporação do selênio na adubação, nas três linhas centrais da parcela, foram retiradas amostras de grãos de parcelas aleatórias de diferentes genótipos e, na análise de Se no tecido vegetal, resultou em teores de Se abaixo do limite de detecção no resultado da digestão em ICP-OES. Sendo assim, fica evidenciado que as plantas que não receberam a aplicação de Se cresceram em solo com baixo teor natural de Se, o que não foi suficiente para promover a biofortificação do arroz, em contrapartida à subparcela com a aplicação de ureia enriquecida com selênio cujos genótipos foram biofortificados.

Em avaliação sobre a biofortificação agrônômica de Fe, Zn e Se, em diversas culturas, Bilski et al. (2012) concluíram que baixos teores de elementos são importantes restrições do solo à produção agrícola. A adição de fertilizantes promoveu incrementos nos seus teores em aveia, azevém perene, centeio, triticale, cevada e trigo, uma vez que plantas bem nutridas com estes elementos podem promover a sua translocação para os grãos, promovendo melhorias na qualidade do alimento. Além disso, estudos anteriores indicam efeitos benéficos do Se, pois este aumenta a atividade antioxidante nas plantas, levando a um melhor rendimento das plantas (HARTIKAINEN; XUE; PIIRONEN, 2000; LYONS et al., 2009).

Tabela 9 - Resumo da análise de variância individual dos teores de selênio (Se) nos grãos (mg kg^{-1}) e parte aérea (mg kg^{-1}) de arroz de terras altas nos dois ambientes.

EPAMIG				
FV	GL	QM		
		Grão C/ Se	Parte Aérea C/ Se	
Genótipos (G)	19	0,1954*	0,6043*	
Blocos	2	0,1392	0,4252*	
Erro	38	0,0646	0,1269	
Média		0,98	2,10	
CV (%)		25,86	16,97	
UFLA				
FV	GL	QM		
		Grão C/ Se	Parte Aérea C/ Se	
Genótipos (G)	19	0,4675*	0,2737*	
Bloco	2	0,4404*	0,3343	
Erro	38	0,1332	0,1339	
Média		1,63	1,90	
CV (%)		22,44	19,28	

Fonte: Do autor (2019).

*significativo ($p < 0,05$) pelo teste F.

No que se refere aos teores de Se, há relatos na literatura de maior concentração desse micronutriente na parte aérea, em contrapartida ao acúmulo de Se no grão (BOLDRIN et al., 2013), em que são demonstrados maiores teores acumulados na parte aérea na maioria dos genótipos avaliados (TABELA 10). Entretanto é mais prudente a seleção de genótipos com maiores teores de Se no grão, ou em ambos os caracteres. Elevados teores de Se foram observados nos genótipos CMG F6 LAM 20-2, BRS Esmeralda, CMG 2188 e CMG ERF 221-19, no ambiente EPAMIG e nos genótipos CMG ERF 221-16, CMG 2188, CMG ERF 221-19 e CMG ERF 85-15, no ambiente UFLA. Fica demonstrada a variabilidade presente nos genótipos avaliados. Sendo assim, é provável que a exploração da variação genotípica seja um método eficaz para a biofortificação de Se na cultura do arroz.

As médias obtidas dos teores de Se, em grãos e parte aérea de arroz, são apresentadas na Tabela 10. As maiores concentrações de Se em grãos foram observadas, no ambiente UFLA, e essas concentrações foram maiores nos genótipos CMG ERF 221-16, CMG 2188 e CMG ERF 85-15. Já no ambiente EPAMIG, foram maiores nos genótipos CMG F6 LAM 20-2, BRS Esmeralda e CMG 2188. Boldrin et al. (2013), em trabalho realizado na cultura do arroz, observaram, quanto às fontes de Se aplicadas via solo, que o selenato de sódio proporcionou um aumento de 6% na produção de matéria seca da parte aérea e aumento em 450% os teores de Se no grão em decorrência da aplicação via foliar.

A maneira mais econômica, para introduzir o elemento Se, em maiores quantidades na dieta humana, é pelo fornecimento de Se necessário por meio de alimentos amplamente utilizados em sua maioria por cereais e leguminosas (THAVARAJAH; WARKENTIN; VANDENBERG, 2010). Esse método é, portanto sustentável, de baixo custo e não requer mudanças no comportamento dos consumidores. Desse modo, o arroz é amplamente cultivado no Brasil, tanto em condições de sequeiro (terras altas) quanto em sistemas inundados, sendo uma cultura de importância mundial para o combate à fome e/ou fome oculta. Desse modo, aumentar a concentração de Se, nos grãos de arroz via fertilização, pode ser benéfico para a saúde humana.

Tabela 10 - Médias dos teores de selênio em grãos e parte aérea de arroz (P.A.) em (mg kg^{-1}), em análise individual dos experimentos.

Genótipos	EPAMIG				UFLA			
	Grão		P.A.		Grão		P.A.	
CMG F6 LAM 20-2	1,3981	a	2,0316	c	1,5585	c	1,6677	a
CMG ERF 85-14	0,7673	b	1,8838	c	1,6102	c	1,8434	a
BRS Esmeralda	1,4795	a	2,7405	b	1,7027	c	1,7005	a
CMG ERF 221-16	1,1123	a	1,4711	c	1,9693	b	2,3733	a
CMG 2119	1,1335	a	1,7926	c	1,6213	c	1,7716	a
BRSMG Caçula	0,8833	b	2,2454	b	1,1016	c	1,2506	a
CMG ERF 85-6	0,9306	b	1,8482	c	1,6667	c	1,8711	a
CMG 2187	1,1117	a	1,4174	c	1,5027	c	1,4781	a
CMG 2188	1,2357	a	2,1078	c	2,5818	a	1,8315	a
CMG 2085	0,6836	b	2,3997	b	1,6634	c	1,8960	a
CMG ERF 85-15	0,7436	b	3,2241	a	2,4625	a	1,9277	a
CMG 221-4	0,5325	b	1,6625	c	1,4822	c	2,2681	a
CMG F6 LAV 1-7	0,7025	b	2,2067	b	1,3684	c	2,1107	a
CMG ERF 221-7	0,7643	b	1,8783	c	0,9868	c	2,4328	a
CMG 1896	0,9735	a	2,4471	b	1,3398	c	1,8762	a
CMG ERF 221-9	1,1270	a	2,5065	b	1,5332	c	1,5123	a
CMG ERF 221-19	1,2162	a	2,0314	c	1,9035	b	1,8078	a
CMG ERF 221-29	1,1213	a	1,7098	c	1,8188	c	2,0755	a
CMG ERF 85-13	1,0139	a	2,5492	b	1,4712	c	2,2556	a
Multilinha	0,7225	b	1,8254	c	1,1775	c	1,9972	a

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas da mesma letra nas linhas pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Em relação à análise de variância conjunta (TABELA 11), o coeficiente de variação (CV%) foi menor que 20%, para quase todos os caracteres avaliados, o que indica uma boa precisão experimental. Apenas o caráter rendimento de grãos inteiros apresentou estimativas entre 20% e 30%, sendo considerado de moderada precisão. O coeficiente de variação (CV%) é definido como a estimativa do erro experimental em porcentagem da estimativa da média. Trata-se de uma das medidas estatísticas mais utilizadas pelos pesquisadores na avaliação da precisão dos experimentos. Costa, Seraphin e Zimmermann (2002), avaliando a distribuição do coeficiente de variação, em experimentos com arroz de terras altas, observou que houve grande variabilidade dos dados entre e dentro de caracteres, com as maiores amplitudes referentes aos caracteres relacionados ao acamamento, por estarem sujeitos à grande influência de vários fatores, fato que ocorreu na expressão do caráter rendimento de grãos inteiros na EPAMIG.

Houve diferença significativa, para todas as características avaliadas, considerando a fonte de variação genótipos (TABELA 11). Ocorreu interação genótipos x ambientes, em todos os caracteres, exceto nos caracteres renda e altura. Logo, percebe-se que o comportamento das linhagens não foi coincidente, nos diferentes ambientes de avaliação, provavelmente, pelas diferentes condições ambientais a que as linhagens foram expostas. O desempenho de cultivares varia, normalmente, com a mudança de ambientes, sendo a interação G x A de grande importância para o melhoramento de plantas.

Tabela 11 - Resumo da análise conjunta dos caracteres: altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de arroz de terras altas nos dois ambientes.

FV	GL	QM				
		Altura	PMG	Renda	Rendimento	Produtividade
Ambiente	1	110596,27*	232,07*	156,49*	2662,34*	577502359,76*
Bloco/Amb.	4	720,34*	12,62*	4,87	165,22	10393019,35*
Genótipos (G)	19	233,65*	59,62*	16,75*	559,44*	23736114,50*
G x A	19	95,49	19,95*	4,67	664,11*	26506130,29*
Erro 1	76	57,06	2,32	4,35	140,18	22320502,63
Selênio (Se)	1	70,42*	0,28	4,76	23227,71*	184,22
G x Se	19	13,77	1,73	3,75	209,52*	4634626,72
A x Se	1	2,82	14,65*	8,97	16904,01*	44,80
G x A x Se	19	17,87	1,22	3,65	206,30*	5673775,25
Erro 2	80	11,90	1,27	3,10	117,52	17708493,89
Média		90,47	26,91	70,59	48,49	3249,05
CV 1 (%)		8,35	5,67	2,95	24,41	16,68
CV 2 (%)		3,81	4,19	2,49	22,35	14,48

Fonte: Do autor (2019).

*significativo ($p < 0,05$) pelo teste F.

Quanto à subparcela com aplicação ou não de selênio incorporado na ureia, o Se foi significativo no Teste F, ao nível 5% de probabilidade, nos caracteres de altura e rendimento de grãos inteiros, não interferindo na produtividade de grãos, peso de mil grãos (PMG) e renda (TABELA 12).

Tabela 12 - Médias dos caracteres altura de plantas (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), renda (%), rendimento de grãos inteiros (%) e produtividade de grãos (kg ha⁻¹), avaliados com relação à subparcela, com ou sem selênio incorporado na ureia, na análise conjunta dos dados.

Características	Selênio	
	Com Selênio	Sem Selênio
Altura de Plantas	89,93 b	91,01 a
PMG	26,87 a	26,94 a
Renda	70,73 a	70,45 a
Rendimento	58,33 a	38,66 b
Produtividade de grãos	3249,93 a	3248,18 a

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas da mesma letra nas linhas pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

A aplicação de Se não interferiu, significativamente, na produtividade de grãos, peso de mil grãos e renda, sendo que o caráter renda apresentou diferença estatística apenas entre os genótipos e entre os ambientes, mas, em ambos os ambientes e tratamentos, a renda de todas as cultivares foi considerada boa, 70%, em média. Esse valor se aproxima dos valores encontrados por Crusciol et al. (1999), sendo assim corroborando com os valores encontrados neste trabalho. O PMG é uma medida que apresenta forte controle genético, mas também é afetado por condições extrínsecas ao ambiente, durante a fase de maturação no campo. O caráter altura de plantas apresentou médias inferiores com a aplicação de selênio, contudo são valores que estão dentro do ideótipo de plantas de arroz por se tratarem de genótipos pertencentes ao VCU. Esse fato pode ser justificado em razão do arranjo experimental; a subparcela com a aplicação de selênio incorporado na ureia, foi alocada nas bordaduras. Sendo assim, o efeito da diferença, na velocidade de crescimento e desenvolvimento dos genótipos, pode sombrear as parcelas adjacentes.

O caráter produtividade não obteve diferença, nas médias analisadas com a aplicação do micronutriente Se incorporado na ureia, em ambos os ambientes, apenas entre os genótipos, que variam de acordo com a característica inerente a cada genótipo. Em estudo na cultura da soja, Martinez et al. (2009), avaliando doses e formas de aplicação de selênio, também observaram que não houve efeito significativo no aumento da produtividade da cultura com a aplicação do micronutriente Se. Eles observaram, ainda, que a aplicação exclusiva de selênio via foliar, para todas as doses testadas, alterou negativamente a produtividade, sendo esse efeito ocasionado pela fitotoxidez e diminuição da área foliar, contudo foram aplicadas quatro doses de selênio (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 kg ha⁻¹), assim, são doses superiores à dose aplicada neste trabalho de 80 g ha⁻¹. Todavia, em trabalho realizado por

Seregina, Nilovskaya e Ostapenko (2001), em que avaliaram a interação de Se com N e demonstraram uma relação no aumento da produtividade de grãos, na cultura do trigo, contudo, apresentando diferenças, conforme a cultivar utilizada, ratificando a importância da variação genotípica para o acúmulo de micronutrientes em plantas.

Pode-se observar um efeito significativo, no caráter rendimento de grãos com a aplicação de selênio, como relatado por Boldrin et al. (2013), reiterando a utilização da biofortificação como alternativa sustentável e viável, para aumentar o teor de Se, em partes comestíveis e maior rendimento de grãos inteiros da cultura do arroz, deste modo, beneficiando o produtor orizícola. Isso é confirmado, na análise do desdobramento, dentro de cada genótipo com relação à subparcela com ou sem aplicação de selênio incorporado na ureia, nos diferentes ambientes avaliados, os quais apresentaram significância para o caráter rendimento de grãos inteiros, demonstrando superioridade nas médias (TABELA 13). O rendimento de grãos foi o único caráter em que a aplicação de Se melhorou a expressão fenotípica, nos genótipos avaliados com a aplicação do selênio incorporado na ureia, em decorrência dos genótipos com a aplicação normalmente com ureia, que se pode destacar na análise conjunta dos genótipos, BRSMG Caçula, CMG 2119, CMG 2188 e CMG ERF 85-13.

Tabela 13 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função do desdobramento de genótipos, dentro dos diferentes ambientes cultivados, para o caráter com ou sem selênio aplicado na subparcela.

(Continua)

Genótipos	Rendimento de Grãos Inteiros							
	Com Se				Sem Se			
	EPAMIG		UFLA		EPAMIG		UFLA	
CMG F6 LAM 20-2	56,58	aA	53,56	bA	47,44	aA	53,43	bA
CMG ERF 85-14	75,47	aA	45,03	bB	21,62	bA	37,62	cA
BRS Esmeralda	65,12	aA	52,12	bA	24,51	bB	47,59	bA
CMG ERF 221-16	58,44	aA	41,80	cA	37,52	aA	38,38	bA
CMG 2119	77,20	aA	82,69	aA	25,80	bA	83,24	aB
BRSMG Caçula	84,93	aA	52,37	bB	16,32	bB	53,89	bA
CMG ERF 85-6	72,96	aA	32,23	cB	38,50	aA	35,51	cA
CMG 2187	66,85	aA	51,17	bA	39,96	aA	51,12	bA
CMG 2188	53,80	aA	64,95	aA	40,07	aB	64,55	bA
CMG 2085	71,58	aA	40,12	cB	28,97	bA	35,19	cA
CMG ERF 85-15	83,16	aA	25,21	cB	20,52	bA	19,18	cA
CMG 221-4	69,19	aA	24,07	cB	37,64	aA	25,17	cA
CMG F6 LAV 1-7	73,09	aA	35,88	cB	36,69	aA	29,28	cA

Tabela 13 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função do desdobramento de genótipos, dentro dos diferentes ambientes cultivados, para o caráter com ou sem selênio aplicado na subparcela.

(Conclusão)

Genótipos	Rendimento de Grãos Inteiros							
	Com Se				Sem Se			
	EPAMIG		UFLA		EPAMIG		UFLA	
CMG ERF 221-7	68,03	aA	50,01	bA	40,83	aA	41,13	cA
CMG 1896	76,32	aA	45,63	bB	24,74	bB	43,62	cA
CMG ERF 221-9	74,83	aA	51,72	bB	39,94	aA	41,29	cA
CMG ERF 221-19	66,95	aA	50,34	bA	42,75	aA	44,87	cA
CMG ERF 221-29	58,23	aA	29,99	cB	43,35	aA	27,95	cA
CMG ERF 85-13	75,81	aA	52,04	bB	28,10	bB	54,00	bA
Multilinha	72,55	aA	51,26	bB	36,67	aA	47,38	bA

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas pertencem ao mesmo agrupamento, de acordo com teste de Scott-Knott (1974), realizado a 5% de probabilidade.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas entre os diferentes ambientes, dentro de cada genótipo e com relação à adubação ou não de Se, pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

As médias correspondentes aos genótipos avaliados são apresentadas na Tabela 14, em função do desdobramento de genótipos dentro da aplicação ou não de selênio incorporado na ureia na subparcela, para o mesmo ambiente cultivado, sendo assim, destacam-se, no ambiente EPAMIG, os genótipos CMG 2119, BRSMG Caçula, CMG ERF 85-15, CMG 1896, CMG ERF 85-13 e, no ambiente UFLA, os genótipos CMG F6 LAM 20-2, BRS Esmeralda, CMG 2119, BRSMG Caçula e CMG 2188.

Tabela 14 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função do desdobramento de genótipos, dentro da aplicação ou não de selênio na subparcela, para o mesmo ambiente cultivado.

(Continua)

Genótipos	Rendimento de Grãos Inteiros							
	EPAMIG				UFLA			
	Com Se		Sem Se		Com Se		Sem Se	
CMG F6 LAM 20-2	56,58	a	47,44	a	53,56	a	53,43	a
CMG ERF 85-14	75,47	a	21,62	b	45,03	a	37,62	a
BRS Esmeralda	65,12	a	24,51	b	52,12	a	47,59	a
CMG ERF 221-16	58,44	a	37,52	b	41,80	a	38,38	a
CMG 2119	77,20	a	25,80	b	82,69	a	83,24	a
BRSMG Caçula	84,93	a	16,32	b	52,37	a	53,89	a
CMG ERF 85-6	72,96	a	38,50	b	32,23	a	35,51	a
CMG 2187	66,85	a	39,96	b	51,17	a	51,12	a

Tabela 14 - Médias do caráter rendimento de grãos inteiros (%), em função do desdobramento de genótipos, dentro da aplicação ou não de selênio na subparcela, para o mesmo ambiente cultivado.

(Conclusão)

Genótipos	Rendimento de Grãos Inteiros							
	EPAMIG				UFLA			
	Com Se		Sem Se		Com Se		Sem Se	
CMG 2188	53,80	a	40,07	a	64,95	a	64,55	a
CMG 2085	71,58	a	28,97	b	40,12	a	35,19	a
CMG ERF 85-15	83,16	a	20,52	b	25,21	a	19,18	a
CMG 221-4	69,19	a	37,64	b	24,07	a	25,17	a
CMG F6 LAV 1-7	73,09	a	36,69	b	35,88	a	29,28	a
CMG ERF 221-7	68,03	a	40,83	b	50,01	a	41,13	a
CMG 1896	76,32	a	24,74	b	45,63	a	43,62	a
CMG ERF 221-9	74,83	a	39,94	b	51,72	a	41,29	a
CMG ERF 221-19	66,95	a	42,75	b	50,34	a	44,87	a
CMG ERF 221-29	58,23	a	43,35	a	29,99	a	27,95	a
CMG ERF 85-13	75,81	a	28,10	b	52,04	a	54,00	a
Multilinha	72,55	a	36,67	b	51,26	a	47,38	a

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, entre a adubação ou não com selênio na subparcela, dentro de cada genótipo e mesmo ambiente, pertencem ao mesmo agrupamento, de acordo com teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Esse fato pode ser explicado em virtude do aumento da atividade antioxidante nas plantas pelo efeito benéfico da aplicação do micronutriente Se via solo sobre o impacto da tolerância ao estresse abiótico. A aplicação de Se protege as plantas de estresses abióticos, visto que as plantas de arroz biofortificadas com Se apresentaram aumento da fotossíntese líquida e melhor eficiência no uso da água, com isso, protegendo as plantas de estresses abióticos, aumentando o rendimento das plantas de arroz (ANDRADE et al., 2018).

Desse modo, além de seu papel nutricional que é importante para a saúde humana, o Se também apresenta importância na proteção antioxidante das plantas. O Se, quando utilizado em conjunto com outros nutrientes na fertilização e, dependendo da dose, pode ativar enzimas como superóxidos (SOD) e catalase (CAT). Essas enzimas atuam na diminuição no estresse oxidativo nas células vegetais e são ativadas na presença de Se (SAIDI; CHTOUROU; DJEBALI, 2014).

Com relação à fonte de variação genótipos, as médias dos caracteres altura, peso de mil grãos, renda, rendimento de grãos inteiros e produtividade de grãos, na análise conjunta (TABELA 15). Nota-se variabilidade existente, para todos os caracteres avaliados, sendo de grande importância para uma etapa de seleção de genótipos superiores.

Tabela 15 - Médias dos caracteres: altura (cm), peso de mil grãos (PMG) (g), rendimento de grãos inteiros (%), renda (%) e produtividade de grãos (kg ha⁻¹) em função dos genótipos na análise conjunta.

Genótipos	Altura	PMG	Renda	Rendimento	Produtividade
CMG F6 LAM 20-2	98,17 a	24,45 f	70,83 a	52,75 b	3713,93 a
CMG ERF 85-14	86,75 b	29,90 a	70,36 b	44,94 c	3036,46 c
BRS Esmeralda	93,00 a	24,85 e	68,97 b	47,34 c	3192,84 b
CMG ERF 221-16	85,25 b	27,40 c	70,62 b	44,04 c	3691,80 a
CMG 2119	88,33 b	23,78 f	72,98 a	67,23 a	3861,72 a
BRSMG Caçula	91,00 b	27,48 c	71,10 a	51,88 b	2859,90 c
CMG ERF 85-6	89,17 b	28,10 c	69,03 b	44,80 c	3394,01 b
CMG 2187	94,00 a	23,76 f	71,20 a	52,28 b	3383,99 b
CMG 2188	100,08 a	23,38 f	70,01 b	55,84 b	3245,83 b
CMG 2085	89,67 b	29,05 b	71,13 a	43,96 c	2858,60 c
CMG ERF 85-15	90,25 b	30,74 a	69,46 b	37,01 c	3201,04 b
CMG 221-4	84,00 b	29,14 b	69,15 b	39,01 c	2917,96 c
CMG F6 LAV 1-7	88,00 b	25,91 d	71,84 a	43,73 c	2571,10 c
CMG ERF 221-7	88,67 b	25,33 e	70,48 b	50,00 b	2953,13 c
CMG 1896	96,33 a	24,90 e	72,14 a	47,58 c	3189,32 b
CMG ERF 221-9	88,33 b	28,64 c	69,13 b	51,94 b	3539,58 a
CMG ERF 221-19	86,67 b	28,34 c	70,02 b	51,23 b	3422,40 b
CMG ERF 221-29	86,83 b	26,51 d	72,02 a	39,88 c	3247,79 b
CMG ERF 85-13	96,00 a	28,70 c	71,79 a	52,49 b	3321,88 b
Multilinha	88,83 b	27,83 c	69,53 b	51,96 b	3377,78 b

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas da mesma letra nas colunas pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

No que se refere à análise da interação do ambiente, quanto à subparcela com a aplicação ou não do selênio incorporado na ureia (TABELA 16), apenas nos caracteres peso de mil grãos e no rendimento de grãos inteiros foram detectadas diferenças significativas ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F. Nota-se que houve diferença significativa, na aplicação do Se incorporado na ureia, com relação ao caráter PMG, nos dois ambientes avaliados, porém não há evidências para se afirmar que a aplicação do micronutriente Se foi superior à subparcela com a aplicação normalmente com ureia, portanto sendo necessários mais estudos sobre este caráter, pois se trata de um caráter quantitativo, sendo controlado por muitos genes e sofrendo forte influência ambiental durante a fase de maturação no campo. Ademais, por ser um componente primário da produtividade de grãos.

Com relação ao caráter rendimento de grão inteiros, o efeito da variação genotípica, no rendimento de grãos inteiros de arroz de terras altas, já é relatado por estudo realizado por Arf et al. (2002). Eles estudaram os efeitos de irrigação por aspersão, e diferentes preparos de solo

em dois anos agrícolas, observando diferenças significativas nos valores de renda, rendimento de grãos inteiros e quebrados e, ainda, que os valores variaram de uma safra agrícola para outra.

Tabela 16 - Médias dos caracteres PMG (g) e Rendimento de Grãos inteiros (kg ha⁻¹) em função do desdobramento da interação ambiente com selênio da subparcela na análise conjunta.

Ambiente	PMG				Ambiente	Rendimento			
	Selênio					Selênio			
	Com		Sem			Com		Sem	
EPAMIG	27,61	aB	28,17	aA	EPAMIG	70,06	aA	33,60	bB
UFLA	26,14	bA	25,71	bB	UFLA	46,61	bA	43,72	aA

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna pertencem ao mesmo grupo, de acordo com teste de Scott-Knott (1974), realizado a 5% de probabilidade.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha com relação à adubação de Se, nos dois ambientes, pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Em relação à análise de variância conjunta dos teores de Se, no grão e parte aérea (TABELA 17), o coeficiente de variação (CV%) foi de 18,07%, para o caráter teor de Se na parte aérea, o que indica uma boa precisão e de 24,11% para o caráter teor de Se no grão, considerado moderado. Nota-se que houve diferença significativa, para a fonte de variação genótipos e interação genótipos x ambientes, em ambos os caracteres, portanto pode-se inferir que a resposta dos tratamentos avaliados não foi coincidente nos diferentes ambientes de avaliação.

Tabela 17 - Resumo da análise conjunta dos teores de selênio (Se) nos grãos (mg kg⁻¹) e parte aérea (mg kg⁻¹) de arroz de terras altas nos dois ambientes.

FV	GL	QM	
		Grão C/ Se	Parte Aérea C/ Se
Ambiente	1	12,42*	1,22*
Bloco/Ambiente	4	0,29*	0,38*
Genótipos (G)	19	0,42*	0,36*
G x A	19	0,24*	0,51*
Erro	76	0,10	0,13
Média		1,30	2,00
CV (%)		24,11	18,07

Fonte: Do autor (2019).

*significativo ($p < 0,05$) pelo teste F.

O selênio apresenta-se na forma aniônica, na solução do solo (oxiânion), competindo por sítios de cargas positivas, interferindo no comportamento sortivo de outros elementos,

dentre eles, o sulfato e o fosfato. Ainda, diminui drasticamente sua atividade na solução do solo por fatores, como teor de argila, baixo pH e lixiviação do selenato. Solos ricos em MO apresentam cargas negativas que aumentam a disponibilidade do Se. Por outro lado, a MO pode complexar o Se, tornando-o indisponível para as plantas. Em estudos realizados por Abreu et al. (2011) e Lessa et al. (2016), foi observada a relação dos teores de Se com a elevação de teor de argila, em solos do cerrado e da interferência do pH no balanço das cargas elétricas. Goh e Lim (2004) verificaram que o aumento de pH proporciona menor adsorção de Se em solos tropicais japoneses.

As médias dos teores de selênio em grãos e parte aérea são apresentadas na análise conjunta dos ambientes (TABELA 18). Os genótipos CMG ERF 221-16, CMG 2119, CMG 2188, CMG ERF 221-19 e CMG ERF 221-19 obtiveram boas médias, para ambos os caracteres, sendo positivo numa etapa de seleção. Porém o objetivo principal é selecionar genótipos com altos teores de Se no grão, como se verifica nos genótipos BRS Esmeralda, CMG ERF 221-16, CMG 2188, CMG ERF 85-15 e CMG ERF 221-19.

Na maioria dos genótipos avaliados, as maiores médias, nos teores de selênio no grão e parte aérea na cultura do arroz, estão representados no ambiente UFLA (TABELA 18). Nesse sentido, nota-se que o ambiente UFLA, na análise da classe textural do solo (TABELA 3), apresenta maiores teores de argila, porém é o local onde se apresentam maiores teores de Se no grão, embora, no solo da UFLA, tenha o maior teor de argila, sua capacidade de disponibilidade de Se foi maior. Entretanto, como observado na Tabela 3, observam-se maiores quantidades de fósforo disponível (P), no ambiente UFLA, em relação ao ambiente EPAMIG, o que representa o comportamento competitivo dos elementos aniônicos. Sendo assim, esse comportamento maior, nos teores de Se no grão na UFLA, pode ser possivelmente explicado pelo alto teor de P na UFLA em comparação com a EPAMIG e possível adsorção do P na argila, por isso, deixando o selenato livre na solução do solo, ocasionando o aumento de Se para ser absorvido pelas plantas. Novais e Smyth (1999) afirmam que o teor de argila e o tipo de argila são os principais fatores que afetam a adsorção de P nos solos. Com isso, nota-se que os parâmetros pH e M.O não explicam essa disposição, uma vez que não apresentam grandes variações, pois apresentam valores similares. Dessa forma, aproximadamente, 20% do selênio aplicado aos solos é aproveitado pelas plantas, ocasionando perdas de selênio não disponíveis pelas plantas (STROUD et al., 2010).

Tabela 18 - Médias dos teores do micronutriente selênio, nos grãos e parte aérea de arroz (mg kg^{-1}), em função da interação genótipos por ambientes e do desdobramento de tratamentos dentro de locais e de locais dentro de tratamentos da análise conjunta.

Genótipos	Grão				Parte Aérea			
	EPAMIG		UFLA		EPAMIG		UFLA	
CMG F6 LAM 20-2	1,3981	aA	1,5585	cA	2,0316	cA	1,6677	bA
CMG ERF 85-14	0,7673	bB	1,6102	cA	1,8838	cA	1,8434	bA
BRS Esmeralda	1,4795	aA	1,7027	cA	2,7405	bA	1,7005	bB
CMG ERF 221-16	1,1123	aB	1,9693	bA	1,4711	cB	2,3733	aA
CMG 2119	1,1335	aA	1,6213	cA	1,7926	cA	1,7716	bA
BRSMG Caçula	0,8833	bA	1,1016	cA	2,2454	bA	1,2506	bB
CMG ERF 85-6	0,9306	bB	1,6667	cA	1,8482	cA	1,8711	bA
CMG 2187	1,1117	aA	1,5027	cA	1,4174	cA	1,4781	bA
CMG 2188	1,2357	aB	2,5818	aA	2,1078	cA	1,8315	bA
CMG 2085	0,6836	bB	1,6634	cA	2,3997	bA	1,8960	bA
CMG ERF 85-15	0,7436	bB	2,4625	aA	3,2241	aA	1,9277	bB
CMG 221-4	0,5325	bB	1,4822	cA	1,6625	cB	2,2681	aA
CMG F6 LAV 1-7	0,7025	bB	1,3684	cA	2,2067	bA	2,1107	aA
CMG ERF 221-7	0,7643	bA	0,9868	cA	1,8783	cA	2,4328	aA
CMG 1896	0,9735	aA	1,3398	cA	2,4471	bA	1,8762	bA
CMG ERF 221-9	1,1270	aA	1,5332	cA	2,5065	bA	1,5123	bB
CMG ERF 221-19	1,2162	aB	1,9035	bA	2,0314	cA	1,8078	bA
CMG ERF 221-29	1,1213	aB	1,8188	cA	1,7098	cA	2,0755	aA
CMG ERF 85-13	1,0139	aA	1,4712	cA	2,5492	bA	2,2556	aA
Multilinha	0,7225	bA	1,1775	cA	1,8254	cA	1,9972	aA

Fonte: Do autor (2019).

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha entre ambientes, dentro de cada genótipo e com relação aos teores de Se e parte aérea, pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), o consumo domiciliar per capita de arroz por habitante ano, no Brasil, é de 73 g dia^{-1} e, no estado de Minas Gerais (MG), é de 93 g dia^{-1} . Já a ingestão diária recomendada de Se, para homens adultos, é de $70 \mu\text{g}$ por dia e, para mulheres adultas, de $60 \mu\text{g}$ por dia (KIPP et al., 2015), sendo um limite máximo de consumo de até $400 \mu\text{g}$ por dia, enquanto ingestões acima podem levar à toxicidade. Por conseguinte, apresentam-se os teores de Se, para ingestão diária ($\mu\text{g dia}^{-1}$), de acordo com o consumo dos brasileiros e habitantes do estado de Minas Gerais, em relação aos teores de Se nos grãos de arroz biofortificados dos 20 genótipos estudados (TABELA 19). Em seguida, é exemplificado o cálculo para valores de ingestão diária ($\mu\text{g dia}^{-1}$) de Se no grão.

Exemplo do cálculo realizado para as cinco maiores médias para o Brasil:

$$\text{CMG 2188} - 73 \text{ g dia}^{-1} \times 1,9088 \text{ mg kg}^{-1} = 139,34$$

$$\text{CMG ERF 85-15} - 73 \text{ g dia}^{-1} \times 1,6031 \text{ mg kg}^{-1} = 117,02$$

$$\text{BRS Esmeralda} - 73 \text{ g dia}^{-1} \times 1,5911 \text{ mg kg}^{-1} = 116,15$$

$$\text{CMG ERF 221-19} - 73 \text{ g dia}^{-1} \times 1,5598 \text{ mg kg}^{-1} = 113,87$$

$$\text{CMG ERF 221-16} - 73 \text{ g dia}^{-1} \times 1,5408 \text{ mg kg}^{-1} = 112,48$$

Por fim, o cálculo realizado para as cinco maiores médias para Minas Gerais:

$$\text{CMG 2188} - 93 \text{ g dia}^{-1} \times 1,9088 \text{ mg kg}^{-1} = 177,52$$

$$\text{CMG ERF 85-15} - 93 \text{ g dia}^{-1} \times 1,6031 \text{ mg kg}^{-1} = 149,09$$

$$\text{BRS Esmeralda} - 93 \text{ g dia}^{-1} \times 1,5911 \text{ mg kg}^{-1} = 147,07$$

$$\text{CMG ERF 221-19} - 93 \text{ g dia}^{-1} \times 1,5598 \text{ mg kg}^{-1} = 145,06$$

$$\text{CMG ERF 221-16} - 93 \text{ g dia}^{-1} \times 1,5408 \text{ mg kg}^{-1} = 143,30$$

Tabela 19 - Ingestão diária de Se ($\mu\text{g dia}^{-1}$), de acordo com o consumo médio de arroz pela população brasileira e pelos habitantes do estado de Minas Gerais, dos 20 genótipos de arroz de terras altas.

Genótipos	Caráter Se no Grão em $\mu\text{g dia}^{-1}$	
	Brasil	Minas Gerais
CMG F6 LAM 20-2	107,92	137,48
CMG ERF 85-14	86,78	110,55
BRS Esmeralda	116,15	147,97
CMG ERF 221-16	112,48	143,30
CMG 2119	100,55	128,10
BRSMG Caçula	72,45	92,30
CMG ERF 85-6	94,80	120,78
CMG 2187	95,43	121,57
CMG 2188	139,34	177,52
CMG 2085	85,67	109,14
CMG ERF 85-15	117,02	149,09
CMG 221-4	73,53	93,68
CMG F6 LAV 1-7	75,59	96,29
CMG ERF 221-7	63,92	81,43
CMG 1896	84,44	107,57
CMG ERF 221-9	97,10	123,70
CMG ERF 221-19	113,87	145,06
CMG ERF 221-29	107,31	136,71
CMG ERF 85-13	90,71	115,56
Multilinha	69,35	88,35

Fonte: Do autor (2019).

Podem-se verificar resultados positivos com a biofortificação de arroz de terras altas nesse experimento. Nota-se a variabilidade entre os genótipos supracitados que apresentaram um elevado acúmulo de selênio no grão, estando de acordo com os limites máximos e mínimos de ingestão diária de selênio, entretanto foi superior ao recomendado pelo *Codex Alimentarius*, que é de $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$. A alternativa seria determinar a melhor dose a ser recomendada, para a inclusão do Se nos fertilizantes nacionais, por meio de novos estudos para a cultura do arroz. Segundo Lyons et al. (2009), Ramos et al. (2011) e Turakainen, Hartikainen e Seppanen (2005), a utilização de selênio, em baixas concentrações, tem efeito benéfico, pois aumenta a atividade antioxidante das plantas.

Há poucos relatos na literatura, no que se refere à avaliação desses caracteres, em experimentos da cultura do arroz de terras altas. Isto demonstra a necessidade de se avaliar mais estudos com Se, no Brasil, levando assim à maior produção vegetal, ao maior conhecimento sobre a variação genotípica, no acúmulo de Se em plantas e a necessidade de se avaliar mais genótipos, quanto à eficiência e resposta à aplicação de Se via solo. Assim sendo, a utilização da biofortificação genética é comprovada, por meio de experimentos em programas de seleção recorrentes e estudos de genética molecular, com o sequenciamento completo do genoma do arroz, na utilização da transgenia e com o advento da edição genômica, uma alternativa em longo prazo com impacto futuro muito promissor. É importante salientar que o selênio não é um elemento renovável na natureza, daí a importância de aumentar o número de pesquisas, em relação às fontes, doses, formas e épocas de aplicação do selênio, nas diferentes culturas no Brasil.

Outro gargalo importante para a biofortificação é a aceitação das culturas biofortificadas pelos produtores e consumidores. O produtor necessita de políticas públicas, para garantir a renda com a produção de alimentos biofortificados e da disponibilidade de alimentos à população, como abertura de leilões para intervir no mercado, por exemplo, da cultura do arroz e oferecer subsídios, para grandes e pequenos produtores, a fim de manter seu preço baixo e ser consumido por diversas classes. Por fim, a alimentação da população, por meio de alimentos biofortificados, em especial, em merendas escolares, geraria um impacto positivo na saúde de toda a população.

5 CONCLUSÕES

A forma de aplicação de Se via solo mostrou-se muito promissora, no sentido de biofortificar os grãos de arroz, usando-se o selenato de sódio como fonte desse elemento. Os teores encontrados nos grãos de arroz submetidos à aplicação de Se na dose de 80 g de Se ha⁻¹ foram capazes de biofortificar os grãos dessa cultura.

A adubação de cobertura com ureia enriquecida de selênio aumentou o rendimento de grãos inteiros e teores de Se nos grãos de arroz, na maioria dos genótipos avaliados, o que permitiu valores altos de ingestão diária de Se ($\mu\text{g dia}^{-1}$). Pode-se concluir, com isso, que há variabilidade genética em arroz de terras altas para aumentos dos teores desse micronutriente.

Portanto esses resultados contribuirão, para definir a utilidade e aplicação do Se, por meio da biofortificação agronômica, para promover um bom incremento de Se, em partes comestíveis, quando a disponibilidade do nutriente é baixa no teor do solo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. B. et al. Sorção de selênio em solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1995–2003, nov./dez. 2011.
- ADAME, E. M. et al. Deficient selenium status of a healthy adult Spanish population. **Nutrición Hospitalaria**, Madrid, v. 27, n. 2, p. 524-528, Nov. 2012.
- ALAEJOS, M. S.; ROMERO, F. J. D.; ROMERO, C. D. Selenium and cancer: some nutritional aspects. **Nutrition**, San Diego, v. 16, n. 5, p. 376–383, May 2000.
- ALFTHAN, G. et al. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: from deficiency to optimal selenium status of the population. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v. 31, p. 142-147, 2015.
- AMIS MARKET DATABASE. Disponível em: <<http://statistics.amis-outlook.org/data/index.html#COMPARE/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- ANDRADE, F. R. et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 164, p. 562–570, Nov. 2018.
- ARF, O. et al. Preparo do solo, irrigação por aspersão e rendimento de engenho do arroz de terras altas. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 321-326, abr./jun. 2002.
- ASHER, C. J.; BUTLER, G. W.; PETERSON, P. J. Selenium transport to roots system of tomato. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 28, n. 2, p. 279-291, Apr. 1977.
- AZEVEDO, F. A.; CHASIN, A. A. M. **Metais: gerenciamento da toxicidade**. São Paulo: Atheneu, 2003. 554 p.
- BAMBARADENIYA, C. N. B.; AMARASINGHE, F. P. **Biodiversity associated with the rice field agroecosystem in Asian countries: a brief review**. Colombo: International Water Management Institute, 2003. 29 p. (Working Paper, 63).
- BAÑUELOS, G. S. et al. Selenium biofortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator *Stanleya pinnata*. **Food Chemistry**, Barking, v. 166, p. 603-608, Jan. 2015.
- BEYER, P. et al. Golden rice: introducing the β -carotene biosynthesis pathway into rice endosperm by genetic engineering to defeat vitamin A deficiency. **Journal of Nutrition**, Springfield, v. 132, n. 3, p. 506-510, Mar. 2002.
- BILSKI, J. et al. Agronomic biofortification of cereal crop plants with Fe, Zn, and Se, by the utilization of coal fly ash as plant growth media. **Advances in Bioresearch**, India, v. 3, n. 4, p. 130-136, Dec. 2012.
- BIOFORT. Disponível em: <<https://biofort.com.br/rede-biofort/>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

BOLDRIN, P. F. et al. Selenato e selenito na produção e biofortificação agrônômica com selênio em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 6, p. 831-837, jun. 2012.

_____. Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 31, n. 2, p. 238–244, Sept. 2013.

BORÉM, A.; RANGEL, P. H. N. **Arroz do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2015. 242 p.

BOUIS, H. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost? **Proceedings of the Nutrition Society**, London, v. 62, n. 2, p. 403-411, May 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n° 6, de 16 de fevereiro de 2009. Aprova o regulamento técnico do arroz, definindo o seu padrão oficial de classificação, com os requisitos de identidade e qualidade, a amostragem, o modo de apresentação e a marcação ou rotulagem. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 17 fev. 2009. Seção 1, p. 3.

_____. Instrução Normativa n° 46, de 22 de novembro de 2016. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura, na forma desta Instrução Normativa e seus Anexos I a V. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 7 dez. 2016. Seção 1, p. 3.

_____. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília: Mapa/Assessoria de Comunicação Social, 2009. 399 p.

BROADLEY, M. R. et al. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilization. **Plant and Soil**, The Hague, v. 332, n. 1/2, p. 5-18, July 2010.

BRODY, T. **Nutricional biochemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1999. 1006 p.

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. et al. Iodine biofortification of wheat, rice and maize through fertilizer strategy. **Plant and Soil**, The Hague, v. 418, n. 1/2, p. 319-335, Sept. 2017.

CARDOSO, B. R. **Efeitos do consumo de castanha-do-brasil (*Bertholetia excelsa* H.B.K.) sobre o estresse oxidativo em pacientes com comprometimento cognitivo leve e a relação com variações em genes de selenoproteínas**. 2014. 112 p. Tese (Doutorado em Ciências dos Alimentos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CARDOSO, B. R. et al. Nutritional status of selenium in Alzheimer's disease patients. **The British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 103, n. 6, p. 803–806, Mar. 2010.

- CARTES, P.; GIANFERA, L.; MORA, M. L. Uptake of selenium and its antioxidative activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms. **Plant and Soil**, The Hague, v. 276, n. 1/2, p. 359-367, Oct. 2005.
- CARVALHO, G. S. et al. Selenium and mercury in Brazilian Cerrado soils and their relationships with physical and chemical soil characteristics. **Chemosphere**, Oxford, v. 218, p. 412-415, Mar. 2019.
- CHAN, Y. H. et al. Adverse systemic arterial function in patients with selenium deficiency. **The Journal of Nutrition, Health & Aging**, Paris, v. 16, n. 1, p. 85-88, Jan. 2012.
- CHEN, L. et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 50, n. 18. p. 5128-5130, Aug. 2002.
- CHILIMBA, A. D. C. et al. Agronomic biofortification of maize (*Zea mays* L.) with selenium in Malawi. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELENIUM IN THE ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH, 1., 2009, Suzhou. **Proceedings...** Hefei: University of Science Technology of China Press, 2009. p. 77-78.
- _____. Maize grain and soil surveys reveal suboptimal dietary selenium intake is widespread in Malawi. **Scientific Reports**, London, v. 1, p. 1-9, Aug. 2011.
- COCHRAN, W. G.; COX, G. M. **Experimental designs**. 2. ed. London, J. Wiley, 1957. 611 p.
- COMBS JÚNIOR, G. F. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 85, n. 5, p. 517-547, May 2001.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Observatório Agrícola. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, v. 4, n. 12, safra 2016/2017, p. 1-158, set. 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/User/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Boletim_Graos_setembro_2017%20(1).pdf>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- _____. Prévia. **Perspectivas para a Agropecuária**, Brasília, v. 6, safra 2018/2019, p. 1-54, 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/images/arquivos/outros/Perspectivas-para-a-agropecuaria-2018-19.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA (CIB). Espera pelo arroz dourado pode estar perto do fim. **CIB**, São Paulo, mar. 2018. Disponível em: <<https://cib.org.br/arroz-dourado/>>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- COSTA, N. H. de A. D.; SERAPHIN, J. C.; ZIMMERMANN, J. P. Novo método de classificação de coeficientes de variação para a cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 243-249, mar. 2002.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Rendimento de benefício e de grãos inteiros em função do espaçamento e da densidade de semeadura do arroz de sequeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 1, p. 47-52, 1999.

CUBADDA, F. et al. Changes in selenium speciation associated with increasing tissue concentrations of selenium in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 58, n. 4, p. 2295-2301, Jan. 2010.

DEL VILLAR, P. M. et al. Competitividade entre o arroz irrigado e o de terras altas no Brasil. In: FERREIRA, C. M.; DEL VILLAR, P. M.; SOUSA, I. S. F. (Ed.). **Desenvolvimento tecnológico e dinâmica da produção do arroz de terras altas no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. cap. 4, p. 51-62.

DJANAGUIRAMAN, M. et al. Selenium - an antioxidative protectant in soybean during senescence. **Plant and Soil**, The Hague, v. 272, n. 1/2, p. 77-86, May 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Arroz: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 245 p. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

FAIRWEATHER-TAIT, S. J. et al. Selenium in human health and disease. **Antioxid & Redox Signaling**, Larchmont, v. 14, n. 7, p. 1337-1383, Apr. 2011.

FANG, Y. et al. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 56, n. 6, p. 2079-2084, Mar. 2008.

FERNANDES, K. F. M. **Biofortificação do arroz, do brócolis e do rabanete com selênio e predição de sua disponibilidade no solo**. 2011. 49 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical: Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2011.

FERREIRA, D. F. **Sisvar**: versão 5.6. Lavras: UFLA/DEX, 2015.

FERREIRA, K. S.; GOMES, J. C.; ROBERTO, C. Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Revista Panamericana de Salud Pública**, Washington, v. 11, n. 3, p. 172-177, Mar. 2002.

FIGUEIREDO, M. A. et al. Zinc and selenium accumulation and their effect on iron bioavailability in common bean seeds. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 111, p. 193-202, Feb. 2017.

FONCECA, M. E. N. et al. **Impact of agriculture on human health and nutrition**. [S.l.: s.n.], 2008. 1 EOLSS.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024**. Paris: OECD-FAO: 2015. 143 p.

_____. **Seguimiento del mercado del arroz de la FAO (SMA)**. Roma: FAO, 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/publicaciones/publicaciones-sobre-el-arroz/seguiamiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>>. Acesso em: 15 maio 2018.

- GABOS, M. B.; ALLEONI, L. R. F.; ABREU, C. A. Background levels of selenium in some selected Brazilian tropical soils. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 145, p. 35-39, Oct. 2014.
- GIBSON, R. Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 361, n. 1/2, p. 291-299, Mar. 2012.
- GOFF, S. A. et al. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. Ssp. Japonica). **Science**, New York, v. 296, n. 5565, p. 92-100, Apr. 2002.
- GOH, K. H.; LIM, T. T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: effect of reaction time, pH and competitive anions on arsenic and selenium adsorption. **Chemosphere**, Oxford, v. 55, n. 6, p. 849-859, May 2004.
- GRAHAM, R. D. et al. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 92, p. 1-74, 2007.
- GUIMARÃES, C. M. et al. Sistemas de cultivo. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. (Ed.). **A cultura de arroz no Brasil**. 2. ed. rev. e ampl. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. cap. 3, p. 53-96.
- HARTIKAINEN, H.; XUE, T. L.; PIIRONEN, V. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. **Plant and Soil**, The Hague, v. 225, n. 1/2, p. 193-200, Oct. 2000.
- HARVESTPLUS. **Our history**. Washington, 2019. Disponível em: <<https://www.harvestplus.org/about/our-history>>. Acesso em: 7 jan. 2019.
- HARVESTZINC. **The 4th Phase of the Project Started**. Turkey, 2019. Disponível em: <<http://www.harvestzinc.org/>>. Acesso em: 7 jan. 2019.
- HAWKESFORD, M. J.; ZHAO, F. J. Strategies for increasing the selenium content of wheat. **Journal of Cereal Science**, London, v. 46, n. 3, p. 282-292, Nov. 2007.
- HILBERT, L. et al. Evidence for mid-Holocene rice domestication in the Americas. **Nature Ecology & Evolution**, London, v. 1, n. 11, p. 1693-1698, Oct. 2017.
- HURST, R. et al. Soil-type influences human selenium status and underlies widespread selenium deficiency risks in Malawi. **Scientific Reports**, London, v. 3, n. 1425, p. 1-6, Mar. 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa de orçamentos familiares 2008-2009**: aquisição alimentar domiciliar *per capita*: Brasil e grandes regiões. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 282 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Brasília: INMET, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 5 out. 2018.
- JOHNSON, A. A. T. et al. Constitutive overexpression of the OsNAS gene family reveals single-gene strategies for effective iron- and zinc-biofortification of rice endosperm. **PLoS One**, San Francisco, v. 6, n. 9, p. e24476, 2011.

JOHNSON, C. C.; FORDYCE, F. M.; RAYMAN, M. P. Symposium on geographical and geological influences on nutrition: factors controlling the distribution of Selenium in the environment and their impact on health and nutrition. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 69, n. 1, p. 119-132, Feb. 2010.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 2001. 331 p.

KENNEDY, G.; BURLINGAME, B. Analysis of food composition data on rice from a plant genetic resources perspective. **Food Chemistry**, Barking, v. 80, n. 4, p. 589-596, Apr. 2003.

KHAN, N. et al. Method validation for simultaneous determination of chromium, molybdenum and selenium in infant formulas by ICP-OES and ICP-MS. **Food Chemistry**, Barking, v. 141, n. 4, p. 3566–3570, Dec. 2013.

KIPP, A. P. et al. Revised reference values for selenium intake. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v. 32, p. 195-199, Oct. 2015.

LENZ, M.; LENS, P. N. L. The essential toxin: the changing perception of selenium in environmental sciences. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 12, n. 12, p. 3620-3633, June 2009.

LESSA, J. H. L. et al. Adsorption-desorption reactions of selenium (VI) in tropical cultivated and uncultivated soils under Cerrado biome. **Chemosphere**, Oxford, v. 164, p. 271-277, Dec. 2016.

LI, H.-F.; MCGRATH, S. P.; ZHAO, F. J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **New Phytologist**, Lancaster, v. 178, n. 1, p. 92-102, Jan. 2008.

LYONS, G. H. et al. Selenium increases seed production in Brassica. **Plant and Soil**, The Hague, v. 318, n. 1/2, p. 73-80, May 2009.

MAIHARA, V. A. et al. Daily dietary selenium intake of selected Brazilian population groups. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Lousanne, v. 259, n. 3, p. 465-468, Mar. 2004.

MARTINEZ, R. A. S. **Biofortificação agronômica da soja com selênio**. 2013. 114 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MARTINEZ, R. A. S. et al. Doses and forms of selenium application on the culture of soybean. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 698-704, maio/jun. 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Projeções do agronegócio: Brasil 2016/17 a 2026/27: projeções de longo prazo**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. 122 p.

MORAES, M. F. et al. Biofortificação: alternativa à segurança nutricional. **Informações Agrônomicas**, Belo Horizonte, n. 140, p. 9–15, dez. 2012.

_____. Evidences of selenium deficiency in Brazil: from soil to human nutrition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELENIUM IN THE ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH, 1., 2009, Suzhou. **Proceedings...** Hefei: University of Science Technology of China Press, 2009. p. 73–74.

MURPHY, K. M.; REEVES, P. G.; JONES, S. S. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. **Euphytica**, Wageningen, v. 163, n. 3, p. 381-390, Oct. 2008.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Ed. UFV, 1999. 399 p.

NUTTI, M. R. et al. Biofortification in Brazil: the HarvestPlus Challenge Programme. In: SERAGELDIN, I. et al. (Org.). **Changing lives. BioVision Alexandria 2006**. Alexandria: Bibliotheca Alexandrina, 2007. p. 289-296.

OLIVEIRA, V. C. de et al. Agronomic biofortification of carrot with selenium. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 42, n. 2, p. 138-147, mar./abr. 2018.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Mundo terá 2,2 bilhões de pessoas a mais até 2050, indica ONU**. New York: ONU, 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mundo-tera-22-bilhoes-de-pessoas-a-mais-ate-2050-indica-onu/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

PAINE, J. A. et al. Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. **Nature Biotechnology**, New York, v. 23, n. 4, p. 482-487, Apr. 2005.

PIEROBON, F. et al. Occurrence of grain chalkiness in upland rice genotypes grown with and without irrigation. **International Journal of Current Research**, India, v. 8, n. 2, p. 26480-26483, Feb. 2016.

PILON-SMITS, E.; QUINN, C. Selenium metabolism in plants. In: HELL, R.; MENDEL, R. R. (Ed.). **Cell biology of metal and nutrients**. Berlin: Springer, 2010. p. 225-241.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Ed. ESALQ, 2009. 451 p.

POBLACIONES, M. J. et al. Agronomic selenium biofortification in triticum durum under Mediterranean conditions: from grain to cooked pasta. **Food Chemistry**, Barking, v. 146, p. 378-384, Mar. 2014.

POGGI, V. et al. Foliar application of selenite and selenite to potato (*Solanum tuberosum*): effect of a ligand agent on selenium content of tubers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 48, n. 10, p. 4749-4751, Oct. 2000.

PREMARATHNA, L. et al. Selenate-enriched urea granules are a highly effective fertilizer for selenium biofortification of paddy rice grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 60, n. 23, p. 6037–6044, June 2012.

RAMALHO, M. A. P. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: Ed. UFLA, 2012. 522 p.

RAMOS, S. J. et al. Response of brachiaria grass to selenium forms applied in a tropical soil. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 58, n. 11, p. 521-527, Jan. 2012.

_____. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1347–1355, out. 2011.

_____. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 56, n. 12, p. 584–888, Mar. 2010.

RAYMAN, M. P. Selenium and human health. **Lancet**, London, v. 379, n. 9822, p. 1256–1268, Feb. 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 5 jan. 2018.

REIS, A. R. et al. Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. **Journal of Cereal Science**, London, v. 79, p. 508-515, Jan. 2018.

_____. Biofortificação agrônômica com selênio no Brasil como estratégia para aumentar a qualidade dos produtos agrícolas. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 128-138, abr. 2014.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, set. 2007.

RIBEIRO, G. J. et al. Efeitos do atraso na colheita e do período de armazenamento sobre o rendimento de grãos inteiros de arroz de terras altas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, n. 5, p. 1021-1030, set./out. 2004.

RIBEIRO, N. D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 31, n. 10, p. 1367-1376, set. 2010.

RÍOS, J. J. et al. Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 116, n. 3, p. 248-255, May 2008.

_____. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 90, n. 11, p. 1914–1919, Aug. 2010.

RIOS, S. D. A. et al. Biofortificação: culturas enriquecidas com micronutrientes pelo melhoramento genético. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 6, p. 713-718, nov./dez. 2009.

ROBERT, K. M. et al. **Harper: bioquímica um livro médico Lange**. 7. ed. São Paulo: Atheneu, 1994. 763 p.

SAIDI, I.; CHTOUROU, Y.; DJEBALI, W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 171, n. 5, p. 85-91, Mar. 2014.

SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. S. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. 2. ed. rev. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p.

SCHRAUZER, G. N. The nutritional significance, metabolism and toxicology of selenomethionine. **Advances in Food and Nutrition Research**, San Diego, v. 47, p. 73112, 2003.

SEREGINA, I. I.; NILOVSKAYA, N. T.; OSTAPENKO, N. O. The role of selenium in the formation of the grain yield in spring wheat. **Agrokhimiya**, Moscow, v. 1, p. 44-50, 2001.

SHARMA, S. et al. The effects of selenium accumulation on biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus*). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELENIUM IN THE ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH, 1., 2009, Suzhou. **Proceedings...** Hefei: University of Science Technology of China Press, 2009. p. 85-86.

SILVA JÚNIOR, E. C. et al. Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. **Chemosphere**, Oxford, v. 188, p. 650-658, Dec. 2017.

SOUZA, G. A. et al. Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings. **Plant Science**, Shannon, v. 210, p. 206-213, Sept. 2013.

SOUZA, M. P. et al. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard. **Plant Physiology**, Rockville, v. 117, n. 4, p. 1487-1494, Apr. 1998.

SRIVASTAVA, A. K. et al. UTR-Dependent Control of Gene Expression in Plants. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 23, n. 3, p. 248-259, Mar. 2018.

STROUD, J. L. et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil. **Plant and Soil**. The Hague, v. 332, n. 1/2, p. 31-40, July 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 782 p.

TAN, J. A. et al. "Selenium in soil and endemic diseases in China." **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 284, n. 1/4, p. 227-235, Feb. 2002.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS (TBCA). **Composição de alimentos**. São Paulo: TBCA, 2017. Disponível em: <<http://www.nware.com.br/tbca/tbca/>>. Acesso em Dezembro de 2017.

TELÓ, G. M. et al. Qualidade de grãos de arroz irrigado colhidos com diferentes graus de umidade em função da aplicação de fungicida. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, p. 960-966, jun. 2011.

TERRY, N. et al. Selenium in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 51, n. 1, p. 401-432, June 2000.

THAVARAJAH, D.; WARKENTIN, T.; VANDENBERG, A. Natural enrichment of selenium in Saskatchewan field peas (*Pisum sativum* L.). **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 90, n. 4, p. 383- 389, July 2010.

TRIJATMIKO, K. R.; DUENAS, C. Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 19792, Jan. 2016.

TURAKAINEN, M.; HARTIKAINEN, H.; SEPPANEN, M. Selenium in plants. In: EUROLA, M.; HIETAMNIEMI, V. **Twenty years of selenium fertilization**. Helsinki: Agrifood, 2005. 108 p. (Proceedings. Agrifood Reports, 69).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Method 3051 A**: microwave assisted acid digestion of sediments sludge, soils and soils. Washington: EPA, 2007. 30 p.

VOLP, A. C. P. et al. Efeitos antioxidantes do selênio e seu elo com a inflamação e síndrome metabólica. **Revista Nutrição**, Campinas, v. 23, n. 4, p. 581–590, jul./ago. 2010.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. A new paradigm for world agriculture: productive, sustainable, nutritious, healthful food system. **Food and Nutrition Bulletin**, Tokyo, v. 21, n. 4, p. 361-366, Jan. 2000.

WHITE, P. J. et al. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 404, p. 1927-1937, Aug. 2004.

_____. Selenium and its relationship with sulfur. In: HAWKESFORD, M. J.; KOK, L. J. (Ed.). **Sulfur in plants: an ecological perspective**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 225–252.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **The New Phytologist**, London, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009.

WINKEL, L. H. et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: a critical review. **Nutrients**, Basel, v. 7, n. 6, p. 4199-4239, May 2015.

XIA, Y. et al. Optimization of selenoprotein P and other plasma selenium biomarkers for the assessment of the selenium nutritional requirement: a placebo-controlled, double-blind study of selenomethionine supplementation in selenium-deficient Chinese subjects. **American Journal of Clinical Nutrition**, New York, v. 92, n. 3, p. 525-531, Sept. 2010.

XIONG, Y. M. et al. Association study between polymorphisms in selenoprotein genes and susceptibility to Kashin-Beck disease. **Osteoarthritis and Cartilage**, London, v. 18, n. 6, p. 817-824, June 2010.

ZHANG, P. C.; SPARKS, D. L. Kinetics of selenate and selenite adsorption/desorption at the goethite/water interface. **Environmental Science and Technology**, Easton, v. 24, n. 12, p. 1848-1856, 1990.

ZHANG, Y. L. et al. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 253, n. 2, p. 437-443, June 2003.

ZHOU, Z. et al. Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 37, n. 8, p. 849-868, Dec. 2002.

ZHU, Y. G. et al. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 14, n. 8, p. 436-442, Aug. 2009.