

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA-UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO EM
CULTIVARES DE REPOLHO**

Eliza Barboza
Engenheira Agrônoma

2018

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA-UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO EM
CULTIVARES DE REPOLHO**

Eliza Barboza

Orientador: Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho

Coorientador: Dr. Hilário Júnior de Almeida

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2018

B238b Barboza, Eliza
Biofortificação agrônômica com selênio em cultivares de
repolho / Eliza Barboza. -- Jaboticabal, 2018
iii, 47 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Ciências Agrária e Veterinárias, 2018

Orientador: Arthur Bernardes Cecílio Filho

Banca examinadora: André Rodrigues dos Reis, Gilmara
Pereira da Silva, Priscila Lupino Gratão, Roberto Botelho Ferraz
Branco

Bibliografia

1. *Brassica oleracea* var. *capitata*. 2. Selenato. 3. Selenito. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.416.8:635.33



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO EM CULTIVARES DE REPOLHO

AUTORA: ELIZA BARBOZA

ORIENTADOR: ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO

COORIENTADOR: HILÁRIO JÚNIOR DE ALMEIDA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Dr. HILÁRIO JÚNIOR DE ALMEIDA
Agrônomo Autônomo / Jaboticabal/SP

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS
Faculdade de Ciências e Engenharia / UNESP /Tupã

Pesquisador Dr. ROBERTO BOTELHO FERRAZ BRANCO
Polo Regional do Centro Leste / APTA - Ribeirão Preto/SP

Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Pós-doutoranda GILMARA PEREIRA DA SILVA
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 13 de abril de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ELIZA BARBOZA – Nascida no dia 22 de outubro de 1986, na cidade de Anápolis, Estado de Goiás. Filha de Marcolino José Barboza Neto e Blanca Rosa Benitez, irmãs Eliana Barbosa e Elaina Barboza. Ingressou no curso de Engenharia Agrônoma em agosto de 2006, na Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Câmpus Rolim de Moura, obtendo o título de Engenheira Agrônoma em janeiro de 2012. Em agosto do mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus Jaboticabal, sob a orientação do Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho concluindo em julho de 2014. Em seguida em agosto de 2014 ingressou no curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) na mesma instituição de ensino sob a orientação do Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho e coorientação do Dr. Hilário Júnior de Almeida.

"Porque, quando sou fraco, então, é que sou forte"

(2 Coríntios 12:10)

A minha família, mãe Rosa, pai Marcolino (in memória), irmãs Eliana e Elaina, sobrinhos Yasminn, Davi e Lorena, por tudo que representam na minha vida.

Ao meu namorado, Ederlon Flávio por todo apoio, carinho, amizade e compromisso.

AGRADECIMENTOS

Sou grata imensamente a Deus por tudo que tem me proporcionado e por sempre me iluminar e mostrar o melhor caminho a seguir e superar as dificuldades.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal por me conceder a oportunidade de fazer o curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, pelos ensinamentos repassados, pelo incentivo e orientação para realizar este trabalho.

Ao meu coorientador Dr. Hilário Júnior de Almeida, pela orientação incentivo e paciência em repassar seus conhecimentos.

À minha família por tudo que representam e fazem por mim, pelo incentivo, apoio.

A Ederlon Flávio por todo carinho, incentivo, companheirismo, compreensão e por estar sempre ao meu lado me dando força para superar as dificuldades.

Aos amigos e colegas Tatiane Jeromini, Tatiana Pagan, Iolanda Reis, Alesxon Dutra, Juan Cortez, Ludmila Freitas, Ivanildo Amorin, Victor Vergara, Leonardo Correia, Rodolfo Ribas, Saulo Strazeio e Jordana Flores pela amizade, ajuda, horas de lazer, companheirismo e aprendizados durante essa trajetória.

Aos funcionários do Setor de Olericultura e Plantas Aromático – Medicinais, Inauro, Reinaldo e Claúdio.

As funcionárias Sônia e Sidnéia, pela grande ajuda em laboratório.

Muito obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

SUMÁRIO

RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE TABELA.....	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Características do repolho	3
2.2 Selênio	3
2.2.1 Histórico e características químicas.....	3
2.2.2 Selênio em humanos	5
2.2.3 Selênio na planta	7
2.2.4 Biofortificação com Se	11
2.2.5 Toxicidade por Se em humanos e em plantas.....	14
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
2.1 Local	17
2.2 Tratamentos e delineamento experimental	17
2.3 Instalação e condução dos experimentos	17
2.4 Características avaliadas	18
2.4.1 Teor e acúmulo de Se.....	18
2.4.2 Área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz.....	18
2.4.3 Produtividade e massa seca do repolho	19
2.4.4 Teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e enxofre.....	19
2.4.5 Análise estatística	19
3 RESULTADOS	20
3.1 Experimento 1 – Se como selenato	20
3.1.1 Teor e acúmulo de Se	20
3.1.2 Área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz	21
3.1.3 Produtividade	22
3.1.4 Massas secas de raiz, caule e repolho.....	22
3.1.5 Teor e acúmulo de N, P e S	23
3.2 Experimento 2 – Se como selenito.....	25

3.2.1 Teor e acúmulo de Se	25
3.2.2 Área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz	26
3.2.3 Produtividade	27
3.2.4 Massas secas de raiz, caule e repolho.....	28
3.2.5 Teor e acúmulo de N, P e S	29
4 DISCUSSÃO	30
5 CONCLUSÃO.....	33
6 REFERÊNCIAS.....	34

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO EM CULTIVARES DE REPOLHO

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi avaliar concentrações de selênio (selenato e selenito de sódio) no crescimento, produção e biofortificação de duas cultivares de repolho. Para isso foram realizados dois experimentos em casa de vegetação, em sistema hidropônico, no período de julho a novembro de 2014, na UNESP, campus Jaboticabal-SP. Os experimentos diferiram conforme a fonte de selênio (Se) utilizada (selenato e selenito de sódio). Em ambos os experimentos, avaliaram-se dois fatores, sendo: duas cultivares de repolho ('Fênix' e 'Red Dynasty') e cinco concentrações de Se (0, 5, 15, 30 e 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$) na solução nutritiva. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com esquema fatorial 2 x 5 e quatro repetições. As variáveis analisadas foram o teor e acúmulo de Se na raiz e cabeça de repolho, área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz, produtividade de repolho, massa seca de raiz, caule e cabeça de repolho e o teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e enxofre na cabeça de repolho. As fontes selenato e selenito promoveram o crescimento das raízes de repolho devido aos aumentos verificados em área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz, em baixas concentrações de Se aplicadas. O aumento da produção de massa seca de raiz provavelmente foi devido o maior crescimento da raiz, que foi influenciado pelo fornecimento de Se. A massa seca do caule foi diferente apenas entre as cultivares de repolho com aplicação de selenato ou selenito. O teor de nitrogênio apresentou diferenças apenas entre as cultivares quando utilizada a fonte selenito. Ambas as fontes de Se também proporcionaram aumentos na absorção de fósforo e enxofre quando baixas concentrações de Se foram fornecidas. Observou-se que a aplicação de até 16,77 e 7,54 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se com as fontes selenato e selenito, respectivamente, proporcionaram os maiores incrementos na produtividade do repolho, e mesmo com a redução da produtividade com concentrações acima destas, os valores foram maiores que o tratamento controle. Isso indica que o Se foi benéfico ao repolho, pois não reduziu a sua produção. Verificou-se que a biofortificação foi eficiente para ambas as cultivares de repolho, que absorveram e acumularam Se na cabeça de repolho em função do incremento de Se, tanto com selenato como selenito.

Palavras-chave: *Brassica oleracea* var. *capitata*, selenato, selenito.

AGRONOMIC BIOFORTIFICATION WITH SELENIUM IN CABBAGE CULTIVARS

ABSTRACT - The objective of this research was to evaluate concentrations of selenium (sodium selenate and selenite) in the growth, production and biofortification of two cabbage cultivars. Two experiments were carried out in greenhouse under hydroponic system, from July to November, 2014, at UNESP, Jaboticabal-SP campus. The experiments differed according to the source of selenium (Se) used (sodium selenate and selenite). In both experiments two factors were evaluated: two cabbage cultivars ('Fênix' and 'Red Dynasty') and five concentrations of Se (0, 5, 15, 30 and 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$) in the nutrient solution. The experimental was a randomized block design, with 2 x 5 factorial and four replications. The variables analyzed were the content and accumulation of Se in the root and shoot cabbage, evaluating area, diameter, length, density and dry mass in the root, cabbage yield, stem and cabbage head, and the content accumulation of nitrogen, phosphorus and sulfur in the cabbage shoot. Selenate and selenite sources promoted the growth of cabbage roots due to increases in area, diameter, length and root density at low concentrations of Se applied. The increase in root dry mass production was probably due to higher root growth, which was influenced by the supply of Se. The dry mass of the stem was different only between the cabbage cultivars with application of selenate or selenite. The nitrogen content presented differences only among the cultivars when the selenite source was used. Both S sources also provided increases in phosphorus and sulfur absorption when low concentrations of if were provided. It was observed that the application of up to 16,77 and 7,54 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Se with selenate and selenite sources, respectively, provided the greatest increases in cabbage yield, and even with the reduction of productivity with concentrations above these, the values were higher than the control treatment. These indicate that the Se was beneficial to the cabbage, since it did not reduce its production. It was verified that biofortification was efficient for both cabbage cultivars, which absorbed and accumulated Se in the cabbage head as a function of the increase of Se, with both selenate and selenite.

Keywords: *Brassica oleracea* var. *capitata*, selenate, selenite.

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Quantidades de Se recomendada para ingestão diária.....	6
--------------------------------------------------------------------------	---

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema do metabolismo de Se em plantas. O selenato é absorvido pelas raízes através transportadores de sulfato. Este é transportado para as folhas pelo xilema, sendo transformado a dimetil-seleneto e dimetil-diseleneto volátil. A APS, APR e SMT aumenta o acúmulo (A) e a tolerância (T) de Se em plantas.....10
- Figura 2.** Teor e acúmulo de Se na raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....20
- Figura 3.** Área, diâmetro, comprimento e densidade radicular de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....21
- Figura 4.** Produtividade do repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....22
- Figura 5.** Massa seca (MS) de raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....23
- Figura 6.** Teores de P e S na cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....24
- Figura 7.** Acúmulos de N, P e S na cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....25
- Figura 8.** Teores e acúmulos de Se na raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....26
- Figura 9.** Diâmetro, comprimento e densidade de raiz de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....27
- Figura 10.** Produtividade do repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....28
- Figura 11.** Massa seca (MS) de raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....28

Figura 12. Teor de S e acúmulos de N, P e S na cabeça de repolho em função de concentrações de Se. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.....29

1 INTRODUÇÃO

O Se é micronutriente para humanos e animais (NAWAZ et al., 2015), desempenhando papel crítico ao bom funcionamento do sistema imunológico e na defesa antioxidante do organismo (HURST et al., 2013). A recomendação diária de Se, conforme a Chinese Nutrition Society, para pessoas adultas, compreende a quantidade de 50 a 200 $\mu\text{g dia}^{-1}$ (CNS, 1990; FORDYCE, 2013).

O elemento é obtido por humanos principalmente via ingestão de alimentos contendo Se. Porém, as concentrações de Se nos alimentos dependem dos teores no solo e este é variável nas diferentes regiões do globo (MÉPLAN; HESKETH, 2012). Com isso, estima-se que entre meio e um bilhão de pessoas no mundo possuem inadequada ingestão de Se (COMBS, 2001; CARYA et al., 2017). No Brasil, as regiões Sudeste e Centro-oeste têm indícios de apresentarem deficiência de Se, devido a possuir baixos teores no solo (MARTENS; COZZOLINO, 2002).

Para contornar tal situação, têm sido propostas estratégias que visam aumentar os teores de Se na população. Dentre as estratégias, a biofortificação agrônômica com Se tem sido a mais promissora por ser um método viável para aumentar a concentração de Se nos alimentos (RAMOS et al., 2010). Alguns trabalhos já foram realizados no Brasil para avaliar a aplicação de Se em culturas como alface (RAMOS et al., 2011), soja (REZENDE et al., 2011) e arroz (BOLDRIN et al., 2012; REIS et al., 2013), e que resultaram em aumentos nos teores de Se nesses vegetais.

Conforme Finley (2006), o Se contido em alimentos de origem vegetal se apresenta como mais biodisponível para humanos. No entanto, as frutas e as hortaliças, em geral, apresentam baixos teores de Se e fornecem menos de 8% do aporte de Se na dieta (COMBS, 2001). Verifica-se, ainda, que no Brasil, as concentrações de Se nos vegetais também é baixa (FERREIRA et al., 2002), o que poderia sugerir que a população apresenta deficiência de Se.

Para as plantas, o Se ainda não é considerado elemento essencial, porém, algumas espécies podem absorver e acumular em seus tecidos, como as brássicas, e tornar-se fonte de Se para nutrição humana. Mas, apesar de não essencial aos vegetais, o Se aplicado em baixas concentrações pode ser benéfico às plantas, como verificado em alface por Ramos et al. (2011), com 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, e por RIOS et al. (2013), com 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Em brássicas, verificaram-se efeitos

positivos com o fornecimento de Se, pelo aumento da biomassa e do teor de nitrogênio em rabanete (SCHIAVON et al., 2016), elevação do teor de S em brotos de brássicas (ÁVILA et al., 2014) e incremento da produção de couve-flor (OANCEA et al., 2016).

As formas de Se predominantemente absorvidas pelas raízes são o selenato (SeO_4^{2-}) e o selenito (SeO_3^{2-} ; HSeO_3^- ; H_2SeO_3) (WHITE et al., 2004), sendo também as mais empregadas nos programas de biofortificação. A absorção e a mobilidade dessas formas dentro das plantas são diferentes, sendo o selenato mais facilmente transferido para a parte aérea enquanto o selenito tende a acumular-se nas raízes (ZHANG et al., 2003). Devido às semelhanças químicas entre o sulfato (SO_4^{2-}) e o selenato (SeO_4^{2-}), estas formas químicas são absorvidas pelos mesmos sítios de absorção nas raízes (SORS et al., 2005), enquanto o mecanismo de absorção do selenito (SeO_3^{2-}) ocorre por meio de transportadores de fosfato (SONG et al., 2017).

Diante do que foi relatado, dentre as hortaliças promissoras para o uso da técnica de biofortificação com Se tem-se o repolho. O repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata*) é uma planta pertencente a família Brassicaceae, que possui alto valor nutritivo, constituindo-se em alimento de ótima qualidade para o consumo humano (FILGUEIRA, 2000; LÉDO et al., 2000). No Brasil, o repolho está incluído entre as hortaliças mais consumidas (FONTANÉTTI et al., 2006).

O objetivo deste trabalho foi avaliar concentrações de Se (selenato e selenito de sódio) no crescimento, produção e biofortificação de duas cultivares de repolho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características do repolho

O repolho é uma hortaliça da família Brassicaceae (PANG et al., 2015), e constitui-se como planta herbácea, bienal, porém normalmente é cultivada como cultura anual (CARVALHO; IKUTA, 2003). A planta é formada por inúmeras folhas arredondadas que se imbricam, formando uma "cabeça" compacta, que é a parte comestível da planta (FILGUEIRA, 2008; TIVELLI; PURQUERIO, 2008). A cabeça pode ser pontuda, redonda ou achatada, e seu peso varia entre 0,5 kg a 3,5 kg (FILGUEIRA, 2008). As folhas são cerosas e são classificadas comercialmente por sua coloração (verde e roxa) e textura das folhas (lisa e crespa) (LANA; TAVARES, 2010).

A hortaliça é originária de clima temperado, independe do fotoperíodo, sendo a temperatura fator limitante para o desenvolvimento da planta (SILVA JÚNIOR, 1987; FILGUEIRA, 2008). A temperatura média para cultivo do repolho está em torno de 25°C durante o dia e 17°C durante a noite com umidade relativa em torno de 60 a 90% (TIVELLI; PURQUERIO, 2015).

No Brasil, devido ao melhoramento genético das cultivares de repolho, o cultivo é largamente distribuído em todas as regiões (FILGUEIRA, 2003).

O repolho é o mais importante dentro do grupo *B. oleracea*, com uma produção mundial anual de 55 milhões de toneladas (FAO, 2014). É uma cultura que se destaca devido a ser um alimento de excelente qualidade (FERREIRA; RANAL; FILGUEIRA., 2002). Em 100 g de repolho, há 1,8 g de proteína, 0,1 g de gordura, 4,6 g de carboidratos, 0,6 g minerais, 29 mg de cálcio, 0,8 mg de Fe, 14,1 mg de sódio, além de vitaminas A e C (TIWARI; SINGH; MAL, 2003).

2.2 Selênio

2.2.1 Histórico e características químicas

O Se é um elemento químico que foi descoberto em 1817 pelo professor de química, em Estocolmo, Jöns Jacob Berzelius, ao observar um líquido pardo-avermelhado no fundo da câmara de chumbo utilizada na produção de ácido sulfúrico. A esta nova substância, foi dada o nome de selênio, termo que deriva do grego Selene (Lua), por analogia ao telúrio, cujo nome deriva de tellus (Terra). Poucos dias antes de Berzelius fazer a sua comunicação científica sobre este novo

elemento, ele descobre um minério com elevado teor de selênio, ao qual chamou EUCAIRITE, que quer dizer no momento exato.

Durante muitos anos, este elemento permaneceu apenas como uma curiosidade de laboratório, pois não se conhecia nenhuma aplicação prática, até que, em 1873, Willoughby Smith descobriu que a resistência elétrica do selênio diminuía com o aumento da intensidade de luz incidente. Esta descoberta permitiu desenvolver as células fotoelétricas e outros dispositivos elétricos sensores de luz (BUTTERMAN; BROWN, 2004). Contudo, o Se teve seu reconhecimento como nutriente de importância ao metabolismo celular de animais em 1957 (SCHWARZ; FOLTZ, 1957). Entretanto, por mais de um século, este elemento permaneceu conhecido como uma toxina (MEHDI et al., 2013; SANTI et al., 2013).

O Se é o 69º elemento por ordem de abundância na Terra. A sua proporção na crosta terrestre é cerca de 10^{-5} a 10^{-6} %, ou seja 0,1 partes por milhão. Encontra-se ocasionalmente no estado nativo no México e na Califórnia, por vezes junto com o enxofre nativo. Ocorre naturalmente em todos ambientes naturais da crosta terrestre, presente em rochas, solos, corpos d'água e atmosfera (DHILON; DHILON, 2016). Na tabela periódica é quimicamente relacionado a outros membros do grupo do Calcogênio (Grupo 16 / VIA), que inclui em ordem crescente de número atômico oxigênio, enxofre, telúrio e polônio (CHAPMAN et al., 2010) e possui número atômico 34 e massa atômica 78,96. Os seus compostos apresentam propriedades químicas similares entre o enxofre e o telúrio, assemelhando-se mais com os compostos de S (TAN, 2003).

O Se é encontrado no ambiente em quatro estados de oxidação (6+, 4+, 0, -2) (NEAL, 1995), sendo estas as formas inorgânicas selenato (SeO_2^{4-}), selenito (SeO_2^{3-}), Se elementar (Se^0) e seleneto (Se^{2-}), e ainda existem as formas orgânicas como selenocisteína (SeCys) e selenometionina (SeMet) (BODNAR et al., 2012; WU et al., 2015). Também pode ser encontrado como dióxido de Se nas cinzas provenientes da calcinação de minérios sulfetados (FISHBEIN, 1991). Em condições naturais, os teores de Se em águas são bastante baixos, não ultrapassando 2 - 3 $\mu\text{g L}^{-1}$ (WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO, 1987). Na atmosfera, contribuições advindas de fontes naturais por formas voláteis do elemento são inexpressivas (0,1 a 10 ng m^{-3}). O elemento é raramente encontrado no seu estado nativo, mas é constituinte principal de cerca de 40 minerais (COOPER; BENNETT; CROXTON, 1970).

O Se pode ser obtido essencialmente a partir das lamas depositadas nas câmaras de chumbo das fábricas de ácido sulfúrico; partindo dos lodos anódicos das refinações de cobre e níquel e a partir dos minérios de Se (SILVA, 1993). Dependendo da forma química, o Se pode ser tóxico, pois o selenato e o selenito são espécies químicas muito solúveis em água e concentrações relativamente baixas são tóxicas para sistemas biológicos. Os selenetos também são espécies químicas altamente tóxicas e reativas, contudo, elas são rapidamente oxidadas a Se^0 . Este último é insolúvel em água e não possui nenhuma toxicidade para os sistemas biológicos (WACHOWICZ et al., 2001).

2.2.2 Selênio em humanos

O Se é um micronutriente para saúde humana e animal. O Se auxilia em processos fisiológicos, como a modulação do sistema imunológico, desintoxicação de metais pesados, xenobióticos e na regulação do hormônio tireoidiano (ROMAN; JITARU; BARBANTE, 2014). Além disso, os benefícios proporcionados pelo Se para a saúde incluem o menor risco de câncer (MÉPLAN; HESKETH, 2014) e a redução de doenças neurodegenerativas (CARDOSO et al., 2015).

A deficiência de Se pode provocar a doença de Keshan, que é uma cardiomiopatia congestiva e a doença de Kashin-Beck, que pode gerar um distúrbio na formação óssea (YANG et al., 2010). A Dietary Recommended Allowances (RDAs) (2000) indica que $55 \mu\text{g Se dia}^{-1}$ é uma dose adequada para homens e mulheres adultos. Já o Conselho de Peritos da Organização Mundial de Saúde propôs $400 \mu\text{g dia}^{-1}$ como o limite superior da faixa segura para ingestão média diária de Se para adultos (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1996). Conforme a tabela 1 verifica-se que a quantidade de ingestão diária de Se pode variar com a idade, sexo e em condições especiais (gestantes, lactantes).

Tabela 1. Quantidades de Se recomendada para ingestão diária.

Faixa etária	Recomendação	
Recém-nascido e crianças	Se $\mu\text{g dia}^{-1}$	
0-4 meses	10	
4-12 meses	15	
1-4 anos	15	
4-7 anos	20	
7-10 anos	30	
10-13 anos	45	
Adolescentes	Menino	Menina
13-15 anos	60	60
15-19 anos	70	60
Adultos	Homens	Mulheres
19-25 anos	70	60
25-51 anos	70	60
51-65 anos	70	60
Acima de 65 anos	70	60
Gestantes	60	
Lactantes	75	

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

Os alimentos são a principal fonte de Se para a nutrição de humanos, que podem conter as formas orgânicas e inorgânicas de Se. As formas orgânicas de Se são mais biodisponíveis para humanos do que as formas inorgânicas (RAYMAN et al., 2008). A absorção de selênio a partir de compostos orgânicos chega a 90-95%, enquanto que a partir de ligações inorgânicas, é inferior em cerca de 10% (FINLEY et al., 2005). Estima-se que 80% do Se da dieta seja absorvido o que depende dos tipos de alimentos. De maneira geral, a absorção global das formas de Se é bem alta (70-95%), variando, porém conforme a fonte e o status de Se do indivíduo (NAVARRO-ALARCON; CABRERA-VIQUE, 2008).

Entre as formas orgânicas a SeMet é a que possui maior capacidade para aumentar os teores de Se na célula animal do que a forma inorgânica selenito (FONTAGNE-DICHARRY et al., 2015; GODIN et al., 2015). A SeMet é absorvida e retida mais eficientemente do que o selenato ou o selenito de sódio (FAIRWEATHER-TAIT, 1997), sendo o principal precursor para a síntese de SeCys (COMINETTI; COZZOLINO, 2009). A SeCys é incorporada em vinte e cinco selenoproteínas já identificadas em mamíferos, tais como a selenoenzima glutathione peroxidase EC 1.11.1.9 (GSH - Px), tioredoxina reductases (TR), iodotironina deiodinases (IDI), e selenoproteína P (SePP) (HUANG; ROSE; HOFFMANN, 2012).

As selenoproteínas são importantes para biossíntese de desoxirribonucleotídeos trifosfato (dNTPs) para o DNA, remoção dos danos ou sinalização dos peróxidos, redução das proteínas oxidadas e membranares e regulação da sinalização redox (PAPP et al., 2007).

De acordo com Schrauzer (2000), o Se deve ser suplementado na forma em que ocorre naturalmente nos alimentos, sendo a SeMet uma importante forma natural. As plantas, algas marinhas e leveduras são capazes de sintetizar a SeMet, porém os humanos não têm mecanismo eficiente e são incapazes de produzir tanto metionina (Met) como SeMet, que são compostos análogos. Nos alimentos de origem vegetal, a forma de Se predominante é a SeMet, tendo maior biodisponibilidade (85-100%) do que a SeMet presente em produtos de origem animal como lácteos e carnes (10-15%) (ALAEJOS; ROMERO; ROMERO, 2000).

As plantas podem, portanto, converter o Se inorgânico principalmente em SeMet, e a incorporam em proteínas no lugar da Met. Outros compostos que contêm Se, como SeCys, metil-Se-Cys e a γ -glutamil-Se-metil-Cys presente nas plantas, não são significativamente incorporadas em proteínas vegetais e estão em concentrações relativamente baixas, independentemente do teor de Se no solo (TAPIERO; TOWNSEND; TEW, 2003).

2.2.3 Selênio na planta

O Se é um elemento que pode ser absorvido pelas plantas, porém sua essencialidade para completar o ciclo vital ainda não foi comprovada. Alguns trabalhos, no entanto, constataram que o Se pode proporcionar efeitos positivos às plantas, como aumentar o teor de clorofila *a* e *b* (SAFFARYAZDI et al., 2012), aumentar a taxa de fotossíntese, concentração CO₂ intercelular e promover maior eficiência de transpiração (ZHANG et al., 2014).

Além disso, alguns trabalhos observaram que o fornecimento de Se pode promover na célula vegetal os mesmos efeitos antioxidantes que na célula animal, proporcionando o aumento da atividade da GSH-Px (SAIDI; NAWEL; DJEBALI, 2014), que também está presente nos vegetais (NOCTOR et al., 2012). O Se quando fornecido em baixa concentração (5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se) pode aumentar as concentrações e atividades de antioxidantes (glutathiona, ácido ascórbico) em rúcula (KHATTAB, 2004). A aplicação de 15 a 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se aumentou a atividade

antioxidante, assim como promoveu o crescimento de plantas de arroz (KHALIQ et al., 2015). Qing et al. (2015) verificaram que em mudas de *Brassica campestris* L. a aplicação de Se $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ reverteu a peroxidação lipídica, bem como as mudanças na ultraestrutura das células foliares induzidas pelo cromo (Cr). Outro efeito benéfico foi observado por Li, Li e Yang (2018), que verificaram que a aplicação foliar de até 200 mg L^{-1} de Se proporcionou o aumento do teor de proteína bruta em nabo (*Brassica rapa*).

Embora as plantas possam absorver muitos elementos não essenciais como o Se, algumas espécies podem também acumular esse elemento nos seus tecidos em concentrações muito altas, sem apresentar efeito negativo. Com isso, as plantas podem ser classificadas em não acumuladores de Se ($<100 \text{ mg kg}^{-1}$ de massa seca), acumuladores de Se ($100 -1000 \text{ mg kg}^{-1}$ de massa seca) e hiperacumuladores de Se ($> 1000 \text{ mg kg}^{-1}$ de massa seca) (BARILLAS et al., 2011).

O conhecimento do metabolismo do Se nas plantas comumente é baseado no metabolismo do S. Isso é devido ao Se e ao S apresentarem propriedades químicas muito semelhantes, sendo o selenato absorvido pelas plantas por transportadores de sulfato (DUMONT et al., 2006) como mostrado na figura 1. Os elementos então competem por processos metabólicos responsáveis pelo desenvolvimento e crescimento de plantas (SORS et al., 2005).

Neste caso, a absorção de selenato pelas células das raízes na rizosfera é catalisada por transportadores de sulfato de alta afinidade (HASTs - sigla do inglês high-affinity sulphate transporters) homólogos aos transportadores de *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana* [L.] Heynh.) AtSULTR1; 1 e AtSULTR1; 2 (TERRY et al., 2000; WHITE et al., 2004; 2007; SHINMACHI et al., 2010; GIGOLASHVILI; KOPRIVA, 2014). Em *Arabidopsis*, o AtSULTR1; 1 contribui pouco para a captação de Se em plantas repletas de S, mas sua contribuição relativa é aumentada quando as plantas têm S insuficiente para o crescimento (EI KASSIS et al., 2007; WHITE et al., 2007). Transportadores de fosfato, tais como o OsPT2 em plantas de arroz, catalisam a absorção de HSeO_3^- (ZHANG et al., 2014) e homólogos aos canais de aquaporina OsNIP2; 1 em arroz também catalisam a absorção de H_2SeO_3 (ZHAO et al., 2010; POMMERENIG et al., 2015). Os transportadores que catalisam a absorção e movimentação de cisteína e metionina dentro da planta também podem transportar SeCys e SeMet (TEGEDER, 2012).

Em resumo, o Se inorgânico após absorvido pelas raízes é reduzido e assimilado em Se orgânico (Figura 1). A absorção do selenato é feita por transportadores de sulfato (MALAGOLI et al., 2015) e o selenito por transportadores de fosfato (ZHANG et al., 2014). O selenato é mais facilmente transportado para a parte aérea, enquanto o selenito permanece em sua maior parte nas raízes (ZHANG et al., 2000), devido ser rapidamente convertido em espécies orgânicas neste órgão da planta (LI et al., 2008).

O selenato após absorvido é ativado pela ATP sulfurilase (APS) (MALAGOLI et al., 2015) e APS redutase (APR). A APS catalisa a hidrólise de ATP para formar de adenosina fosfoselenato, que é reduzido a selenito por APR (SORS et al., 2005). O selenito pode ser reduzido pela ação da glutathiona reduzida (GSH), com ou sem o envolvimento da glutathiona redutase (GR) (HSIEH; GANTHER, 1975). O selenito é convertido a SeCys pela O-acetil-serina (OAS) na presença da enzima cisteína-sintase (CS) (PILON-SMITS; QINN, 2010). A SeCys por sua vez pode ser inespecificamente incorporada em proteínas em vez de Cys, o que pode resultar em toxidez. Entretanto, uma rota alternativa para SeCys é sua conversão em SeMet, que também pode de forma errônea incorporar-se a proteínas, porém com efeito menos prejudicial (GUPTA; GUPTA, 2017). Em não acumuladores de Se o armazenamento de selenato é comum, devido a APS ser uma enzima limitante. Os hiperacumuladores de Se com auxílio da enzima SeCys metiltransferase (SMT) produzem metil-SeCys, e esta pode ainda ser transformada em dimetildiseleneto volátil. As vias metabólicas do S e N interagem ao nível de -acetilserina, com isso alterações na assimilação de S induzidas por Se podem, afetar o metabolismo de N, interferindo na síntese de proteínas e aminoácidos (MALAGOLI et al., 2015).

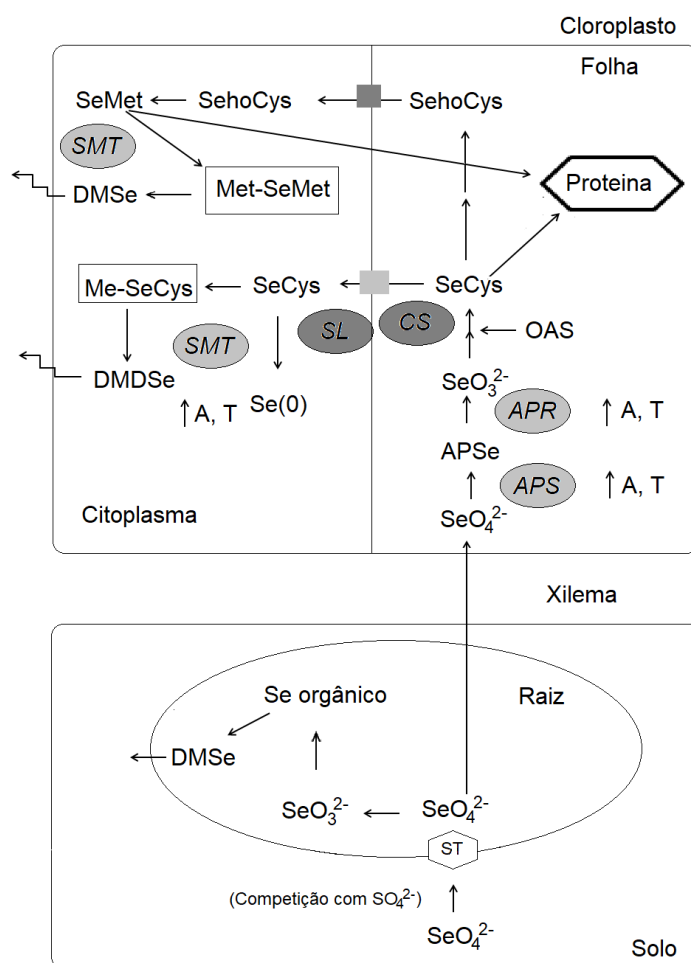


Figura 1. Esquema do metabolismo de Se em plantas. O selenato é absorvido pelas raízes através transportadores de sulfato. Este é transportado para as folhas pelo xilema, sendo transformado a dimetil-seleneto e dimetil-diseleneto volátil. A APS, APR e SMT aumenta o acúmulo (A) e a tolerância (T) de Se em plantas. SeO_4^{2-} = selenato; SO_4^{2-} = sulfato; SeO_3^{2-} = selenito; DMSe = dimetil-seleneto; APR = adenosina 5'-fosfosulfato redutase; APS = adenosina trifosfato sulfurilase; APSe = adenosina 5'-fosfoselenato; APR = adenosina 5'-fosfosulfato redutase; OAS = O-acetil-serina; SeCys = selenocisteína; Me-SeCys = metil-selenocisteína; DMDSe = dimetil-disseleneto; CS = cisteína-sintase; SL = selenocisteína liase; Se^0 = Se elementar; SMT = SeCys metiltransferase; SehoCys = selenohomocisteína; SeMet = selenometionina; Met-SeMet = metil-selenometionina. Fonte: Adaptado de Gupta e Gupta (2017).

As plantas não acumuladoras de Se usam a mesma via de absorção e assimilação de S para metabolizar Se, sendo que os transportadores e as enzimas

não conseguem distinguir entre esses dois análogos químicos (ARVY, 1993). Por outro lado, as espécies hiperacumuladoras de Se conseguem discriminar os dois elementos, e acumulam preferencialmente Se ao invés de S (PILON-SMITS, 2015). Estudos verificaram que os hiperacumuladores de Se usam a mesma via de assimilação de SeO_4 para SeCys, possuindo transportadores especializados ou específicos de Se (PILON-SMITS; QUINN, 2010). E como exemplo, verificou-se que o acúmulo de SeO_4 em *Stanleya pinnata* não foi inibida por altas concentrações de sulfato (SCHIAVON et al., 2015).

Entre as várias plantas que podem hiperacumular Se foram relatadas quase 30 espécies de plantas das famílias Asteraceae, Fabaceae, Brassicaceae (WINKEL et al., 2015). Alguns dos hiperacumuladores de Se incluem espécies como *Astragalus bisulcatus*, *Stanleya pinnata*, *Salix* spp, *Chara canescens* e *Bassia scoparia* (EL MEHDAWI et al., 2012). Mas a maioria das hiperacumuladores pertence aos gêneros *Astragalus* e *Stanleya* (TERRY et al., 2000). Verificam-se também diferenças entre as espécies quanto ao local de acumulação de Se dentro das plantas. Como por exemplo, *Stanleya pinnata* e *Astragalus bisulcatus* acumulam Se principalmente em seus tecidos reprodutivos, porém as não acumuladores tendem a acumular Se em tecidos vasculares típicos, como as folhas (EL MEHDAWI et al., 2015).

Considerando que determinadas espécies de plantas podem acumular Se em concentrações significativas nos seus tecidos, estas poderiam ser fornecidas a população servindo como fonte de Se para nutrição humana. Porém, o acúmulo de Se pelas plantas depende além da sua capacidade de absorção, mas também da quantidade presente no meio de cultivo. Assim, uma estratégia para incrementar Se nas culturas alimentares, que são cultivadas em regiões que apresentam baixos teores nos solos, seria por meio da biofortificação.

2.2.4 Biofortificação com Se

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), IFAD, UNICEF, WFP e WHO (2017) estimaram que o número de pessoas subnutridas no mundo aumentou de 777 milhões em 2015 para cerca de 815 milhões em 2016. É estimado ainda que entre 0,5 a 1 bilhão de pessoas em todo o mundo apresentam deficiência de Se (COMBS, 2001).

A deficiência de Se na população provavelmente está relacionada às baixas concentrações encontradas nos alimentos, uma vez que este é o principal meio para o suprimento nutricional com esse elemento. As baixas concentrações de Se nas culturas agrícolas podem ser devido ao seu cultivo em regiões com teores de Se nos solos abaixo do recomendado. Neste contexto, a biofortificação com Se de culturas tem sido adotada atualmente como estratégia para compensar a deficiência do elemento (MIRLEAN; SEUS-ARRACHE; VLASOVA, 2018).

A biofortificação agronômica consiste na aplicação de fertilizantes contendo Se que pode ser via solo, foliar, sementes e apresenta-se como efetiva estratégia para aumentar a concentração de Se em culturas destinadas à alimentação humana. A biofortificação com Se é relacionada com a bioacumulação de Se em partes comestíveis das plantas, e envolve os processos de absorção, distribuição, acumulação e transformação de Se do solo para as plantas (BAÑUELOS et al., 2015).

O uso da prática da biofortificação de alimentos, entretanto, deve estar baseado no *status* nutricional em que a população se encontra, pois esta pode ser viável para contornar uma situação em que haja deficiência de determinado elemento. A Finlândia foi um dos países pioneiros no uso da biofortificação, pois começou em 1984 a adicionar Se em fertilizantes contendo NPK, sendo a prática adotada devido aos casos de doenças e deficiência de Se constatados no país. Essa experiência se caracterizou como uma prática segura no incremento de Se em culturas agrícolas a um baixo custo, de fácil execução e muito eficaz, que promoveu o aumento do teor de Se na população. Verificou-se que três anos após o início do programa, a ingestão de Se pela população triplicou enquanto a concentração no plasma sanguíneo foi duplicada, com redução da taxa de doenças cardiovasculares e de certos tipos de câncer (ARO; ALFTHAN; VARO, 1995).

Porém, os resultados de biofortificação com Se obtidos em determinado local muitas vezes pode não ser aplicável para outras regiões, devido aos diferentes tipos de solos, às condições climáticas e de cultivo que podem interferir no sucesso desta prática. Com isso, são necessárias pesquisas nas regiões do mundo para verificar essas interações antes de implantar programas de biofortificação.

O Brasil, ao que tudo indica, também pode ter baixo teor de Se disponível à população o que pode ser variável nas regiões brasileiras. Isso foi constatado por

Maihara et al. (2004) e Ambrogi et al. (2016) que verificaram que a região central do país comparada a região amazônica apresenta deficiência moderada da ingestão diária de Se, enquanto em São Paulo verifica-se teor baixo de Se na dieta da população. Mirlea, Seus-Arrache e Vlasova (2018) verificaram que áreas dos pampas litorais, no Sul do Brasil, também apresentam deficiência na ingestão de Se. Baseado na preocupação com uma possível deficiência de Se no país, recentemente o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, conforme instrução normativa nº 46 de 2016, incluiu o Se como micronutriente para as plantas.

Verifica-se que alguns estudos de biofortificação com Se no Brasil já foram realizados em culturas (RAMOS et al., 2011; BOLDRIN et al., 2012), porém são necessários mais trabalhos para melhor entendimento. O sucesso da biofortificação com Se depende de alguns fatores: variação entre cultivares no acúmulo de Se (CARTES et al., 2011; DUMA et al., 2011), concentrações de Se utilizadas (GOLOB et al., 2016), as fontes de Se (RAMOS et al., 2011), interação com nitrogênio, fósforo e enxofre (ZEMKOVÁ et al., 2008), entre outros.

De acordo com Xu et al. (2010), os ânions nitrato, fosfato, sulfato e selenito/selenato podem, individual ou juntamente, ter efeito antagônico na absorção um do outro. Foi relatado que o Se pode influenciar no metabolismo do nitrogênio proporcionando maior absorção e assimilação de N (JEŽEK et al., 2011). Porém, foi observado também que o Se dificulta a absorção de molibdênio (Mo) (HARRIS et al., 2014) e com isso reduz a atividade da enzima nitrato redutase, pois necessita de Mo como cofator e interferindo na via de assimilação de N (SCHIAVON et al., 2016). Com relação ao P conforme Kumar et al. (2016), altas concentrações de Se reduziram o acúmulo de P nas plantas. O selenito, entretanto, compete com o P no processo de absorção (HOPPER et al., 1999) e, como consequência, interfere no conteúdo de P nas plantas (LI et al., 2008). O Se pode ainda interferir no acúmulo de S e vice-versa (LIU et al., 2015), pois seguem rotas metabólicas semelhantes, provocando interação negativa entre os dois elementos (FINLEY et al., 2005). O fornecimento de Se pode, então, alterar a absorção desses nutrientes (PII et al., 2015; VALENTINUZZI et al., 2015) causando desequilíbrio nutricional na planta e, consentemente, afetar a produção da cultura.

Rios et al. (2013) observaram que os altos teores de Se têm efeito negativo na absorção de S em alface, resultando em menor teor de S nas plantas. Foi

relatado também que o Se pode agir sinergicamente com S em vez de ser antagonístico, pois verificou-se aumento do S, além de que compostos formados (cisteína, metionina) a partir deste nutriente não foram alterados (RIBEIRO et al., 2016). White et al. (2004) e Schiavon et al. (2016) também verificaram que o Se na forma de selenato promove a absorção de S na rizosfera.

2.2.5 Toxicidade por Se em humanos e em plantas

A baixa ingestão de Se como em locais em que a ingestão usual para adultos é menor que 20 μg Se por dia (CHILIMBA et al., 2011), assim como o excesso (MARTENS et al., 2015), podem gerar sérias implicações para a saúde humana.

Em algumas regiões da China é comum encontrar toxicidade crônica de Se em humanos e animais devido ao elevado teor deste elemento no solo que, conseqüentemente, promovem altas concentrações nos alimentos, expondo a população a quantidades de Se superiores a 1000 μg por dia (EFSA, 2014; VINCETI et al., 2014; DUNTAS; BENVENGA, 2015;). As quantidades acima de 850 a 900 μg dia⁻¹ de Se são responsáveis por ocasionarem intoxicação em humanos (BAJAJ et al., 2011; LEMIRE et al., 2012).

Os sintomas mais comuns da toxicidade por Se em seres humanos incluem a perda de cabelo, apodrecimento de unhas (RAYMAN et al., 2012), lesões cutâneas (LEMIRE et al., 2012) e distúrbios do sistema nervoso. Todos estes sintomas são recorrentes em regiões seleníferas, como em Enshi e Hubei, na China (LI et al., 2012). A toxicidade por Se em humanos, provavelmente é devido os mecanismos que incluem a indução do stress oxidativo e a substituição de S por Se, resultando em defeitos estruturais (VALDIGLESIAS et al., 2010).

Em diferentes estados nos Estados Unidos (EUA), foram relatados vários casos de intoxicação por Se em humanos no ano de 2008. Isso ocorreu devido à ingestão de um suplemento dietético que continha 200 vezes a concentração de Se (selenito de sódio) descrita no rótulo. A US Food and Drug Administration (FDA) testou o produto e determinou que a concentração de Se seria de 40 800 μg / 1 oz. O produto fabricado foi distribuído principalmente no Leste dos EUA, maior concentração no Sudeste. Foram identificados casos em 10 estados e apenas uma pessoa foi hospitalizada. Estimou-se ainda que a quantidade mediana consumida foi de 41 749 μg / d (sendo que a recomendada era 55 μg dia⁻¹). Entre os sintomas

relatados foram: diarreia (78%), fadiga (75%), perda de cabelo (72%), dor nas articulações (70%), descoloração ou fragilidade das unhas (61%) e náusea (58%). Após 90 dias ou mais os sintomas que persistiram incluíram descoloração e perda da unha (52%), fadiga (35%) e perda de cabelo (29%). A média da concentração inicial de Se no sangue de 8 pacientes foi de $751 \mu\text{g L}^{-1}$ (faixa de referência $\leq 125 \mu\text{g L}^{-1}$). Verificou-se ainda que a concentração inicial média de Se na urina de 7 pacientes foi de $166 \mu\text{g} / 24 \text{ h}$ (intervalo de referência $\leq 55 \mu\text{g} / 24 \text{ h}$) (MAcFARQUHAR et al., 2010).

Dentre os compostos de Se, tanto inorgânico (selenato, selenito) como orgânico, podem apresentar efeito tóxico para o organismo, porém, alguns estudos têm mostrado que as formas inorgânicas são as mais tóxicas. A incorporação não específica de SeMet em proteínas proporciona armazenamento de Se reversível em órgãos e tecidos (SCHRAUZER, 2003). Os compostos orgânicos SeCys, SeMet e os compostos metilados de Se são mais tóxicos quando altas doses são ingeridas (KUROKAWA; BERRY, 2013). Isso ocorre quando há incorporação excessiva que pode levar a malformação estrutural ou perda de atividade enzimática (STADTMAN, 1990).

O estresse oxidativo também tem sido associado como uma das principais causas de toxicidade de Se, tanto para Se inorgânico (HAUSER-DAVIS et al., 2016), quanto as formas orgânicas de Se (HURSKY; PIETROCK, 2015). O estresse oxidativo foi atribuído à capacidade do Se em oxidar tióis (SPALLHOLZ, 1994), removendo os grupos de sulfidrilo na formação de proteínas que são essenciais para os processos oxidativos celulares (MAIER; KNIGHT, 1994) ou pelo metabolismo de Se inorgânico e orgânico que criam metabólitos de Se formando espécies reativas de oxigênio (MISRA et al., 2012).

Devido ao uso prolongado e aplicações indiscriminadas de fertilizantes em programas de biofortificação com Se, a liberação do elemento no ecossistema pode atingir altas concentrações e causar efeitos tóxicos às plantas (WU et al., 2015). Além disso, a irrigação agrícola e as atividades industriais, como as descargas de águas residuais da mineração, usinas de energia de carvão e refinação de petróleo, também levam ao enriquecimento de Se do solo e da água (DOLGOVA et al., 2015). Com isso, o acúmulo excessivo de Se no tecido vegetal pode ser tóxico para maioria das culturas (DIMKOVIKJ et al., 2015).

Os sintomas de toxicidade ocasionados por altas concentrações de Se no meio de crescimento de plantas podem incluir clorose branca com coloração rosa na parte inferior das folhas (DHILLON; DHILLON, 2000), senescência, crescimento atrofiado e baixa produtividade das culturas (RIBEIRO et al., 2016). Entretanto, algumas plantas como as hiperacumuladores podem apresentar maior tolerância às altas concentrações de Se (ZHU et al., 2009). Ao contrário destas, em não acumuladoras, a toxicidade por Se está relacionada à substituição não específica em proteínas em vez de S, levando a disfunção metabólica de enzimas e proteínas dentro da célula. Consequentemente pode ocorrer a formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) e subsequente danos às membranas devido à peroxidação lipídica, o que pode contribuir para a fitotoxicidade de Se em vegetais (TERRY et al., 2000, CHEN et al., 2014). Há evidências, de que o Se interfere na produção de glutathione, e com isso reduz a defesa antioxidante da planta (BOSMA et al., 1991).

Os hiperacumuladores de Se contornam a toxicidade de Se pela metilação de SeCys através da enzima SeCys metil-transferase (SMT) que resulta em metil-selenocisteína (MeSeCys) sendo que este composto não é facilmente incorporado em proteínas (NEUHIERL; BÖCK, 1996). Essa não incorporação de Se em proteínas nas plantas acumuladoras é a base para a sua tolerância ao elemento (EL-RAMADY et al., 2015).

Com isso são necessários mais estudos para melhor compreensão do efeito do Se em plantas, bem como a biofortificação de culturas seja realizada de modo seguro para a nutrição de humanos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

Foram realizados dois experimentos em casa de vegetação, em sistema hidropônico, no Setor de Olericultura e Plantas Aromático-Medicinais da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, no município de Jaboticabal-SP, cujas coordenadas geográficas são 21°15'22" Sul, 48°15'58" Oeste, e altitude de 615 metros.

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os experimentos diferiram conforme a fonte de selênio utilizada (selenato e selenito de sódio). Em ambos os experimentos, os fatores avaliados foram duas cultivares de repolho ('Fênix' e 'Red Dynasty') e cinco concentrações de Se (0, 5, 15, 30 e 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$) na solução nutritiva, em delineamento experimental de blocos casualizados, com esquema fatorial 2 x 5 e quatro repetições.

2.3 Instalação e condução dos experimentos

O semeio de cada cultivar foi realizado em espuma fenólica (Green Up®) contendo 216 células de 2,5; 2,5 e 3,8 cm de largura, comprimento e altura, respectivamente, e mantido em casa de vegetação. Quando as plântulas apresentavam os cotilédones abertos (cerca de 7 dias), procedeu-se o transplante para canais hidropônicos de policloreto de polivinila (PVC), com 0,05 m de diâmetro e 5% de declividade, em sistema NFT (Nutrient Film Technique). Nesta etapa, o fornecimento de solução nutritiva Hogland e Arnon (1950) foi intermitente, alternando a circulação de 15 em 15 minutos. As plântulas permaneceram nestes canais por 10 dias e quando apresentavam quatro folhas totalmente desenvolvida foram transplantadas para canais de crescimento final, com 0,20 e 2,0 m de diâmetro e comprimento, respectivamente, cobertos com papel Tetra Pak® para evitar a incidência de luz na solução nutritiva.

O espaçamento utilizado foi de 0,34 m entre plantas e 1,0 m entre canais de cultivo, os quais foram instalados com 5% de declividade e ligados a um reservatório com capacidade para 40 L de solução nutritiva, sendo essa bombeada de maneira contínua para os canais por meio de bombas hidráulicas submersas. O acionamento das bombas foi controlado por um temporizador, sendo a circulação da solução

nutritiva das 6 às 19 horas. Após vinte dias, quando se fez a renovação da solução nutritiva, os tratamentos foram reaplicados.

Utilizou-se a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), preparada com água deionizada. O pH foi monitorado com a utilização de um peagômetro e mantido durante todo o período experimental entre 5,8 e 6,5. A solução foi renovada sempre que a condutividade elétrica (CE) atingiu $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, correspondente a 70% da inicial.

2.4 Características avaliadas

2.4.1 Teor e acúmulo de Se

A determinação do teor de Se foi feita na cabeça do repolho e raiz, sendo a análise realizada pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF - energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry), conforme método descrito por Tezotto et al. (2013). Para o acúmulo de Se foram feitos os cálculos conforme os teores dos nutrientes e massas secas das partes.

2.4.2 Área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz

Separou-se uma porção de um grama de raízes por planta, as quais foram acondicionadas em frascos de vidro contendo solução de álcool a 20% (v/v), devidamente identificados com os tratamentos avaliados e conservadas sob refrigeração. As determinações do comprimento, diâmetro e área das raízes foram realizadas utilizando o sistema de análise de imagens Delta-T Devices LTD. As raízes de cada planta foram emergidas em azul de metileno por aproximadamente dois minutos e, em seguida, colocadas sobre uma bandeja com água pela qual se realizou a leitura da imagem por um scanner Hewlett Packard modelo 5C. A imagem de cada sistema radicular foi analisada pelo software Delta-T Scan Root Analysis System, que determinou o comprimento (mm), diâmetro (mm) e a área (mm^2) da raiz pelo método de Harris e Campbell (1989). A densidade das raízes foi calculada dividindo-se o comprimento encontrado pelo volume de solução nutritiva (mm cm^{-3} solução nutritiva).

2.4.3 Produtividade e massa seca do repolho

Nos dois experimentos, para ambas as cultivares, a colheita foi realizada com aproximadamente 100 dias após a semeadura, quando apresentavam a cabeça compacta, sendo as plantas divididas em raiz, caule e cabeça de repolho. As cabeças de repolho foram pesadas para determinação da massa fresca e em seguida foi estimada a produtividade do repolho. Posteriormente, todo material vegetal foi lavado em água corrente conforme procedimentos descritos por Boaretto et al. (2009). Após isso, as amostras foram colocadas em sacos de papel e em seguida levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas. Logo em seguida, foi feita a determinação da massa seca (g planta^{-1}) de cada parte da planta de repolho.

2.4.4 Teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e enxofre

Após secagem e moagem das amostras da cabeça de repolho, foi feita a determinação do teor de nitrogênio total (N), teor de fósforo (P) e de enxofre (S), conforme os métodos propostos por Miyazawa et al. (2009). Os acúmulos de N, P e S foram obtidos a partir da multiplicação dos teores de nutrientes pela massa seca da cabeça.

2.4.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F). Foi feito o estudo de regressão polinomial para concentrações de Se. Utilizou-se o software AgroEstat- versão 1.1.0.714 (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

3 RESULTADOS

3.1 Experimento 1 – Se como selenato

3.1.1 Teor e acúmulo de Se

Houve interação entre cultivares de repolho e concentrações de Se para os teores de Se na raiz e cabeça de repolho e para o acúmulo de Se na raiz. Na cabeça de repolho, o acúmulo de Se foi significativo apenas para concentrações de Se. Os teores e acúmulos de Se na raiz (Figura 2 A e C) e cabeça de repolho (Figura 2 B e D) aumentaram com o incremento de Se na solução nutritiva, na forma de selenato.

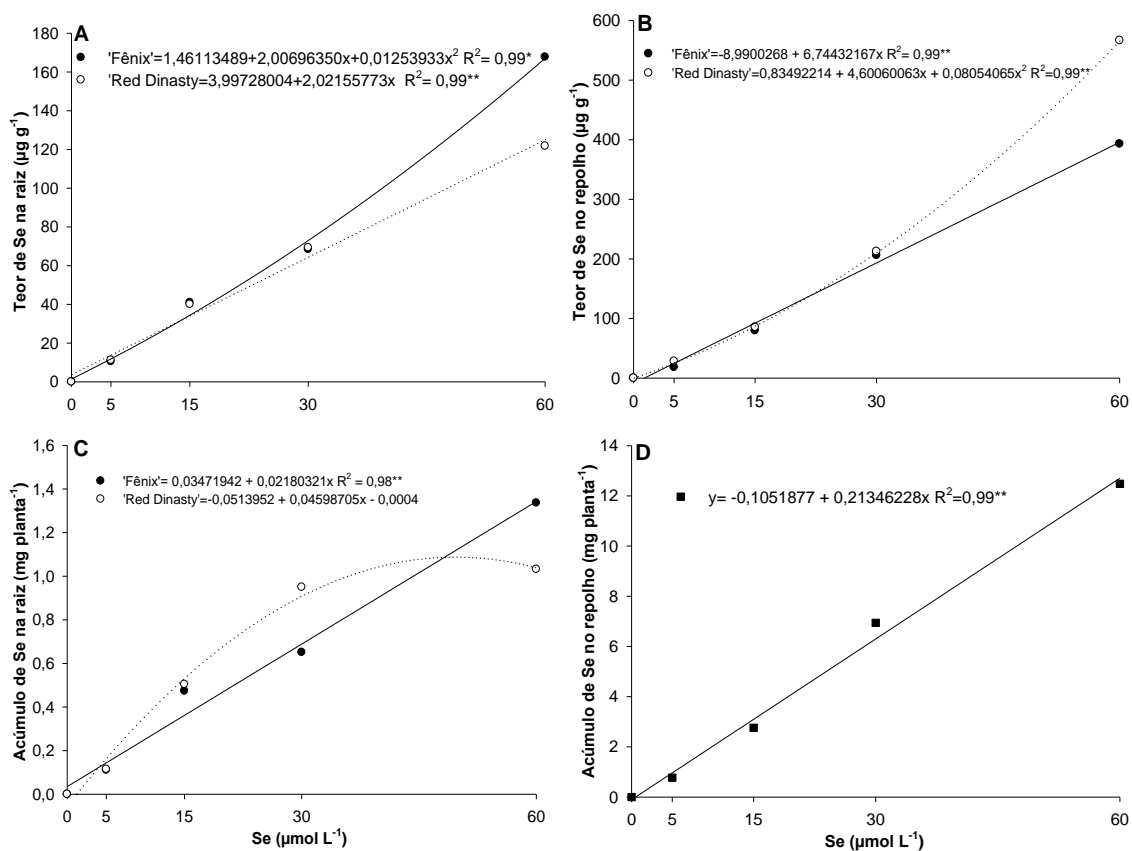


Figura 2. Teor e acúmulo de Se na raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

A concentração de $60 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se proporcionou máximos teores e acúmulos de Se tanto na raiz quanto na cabeça de repolho. Com essa mesma concentração de Se a 'Fênix' teve o maior teor de Se na raiz, acumulando 22,6% mais Se que a 'Red Dynasty'. No entanto, o teor de Se na cabeça de repolho em 'Red Dynasty' foi $171,15 \mu\text{g g}^{-1}$, maior que na 'Fênix' com a concentração máxima de

Se aplicada. O máximo acúmulo de Se na cabeça de repolho apresentou 12,7 mg de Se com aplicação de $60 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

3.1.2 Área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz

A área de raiz foi influenciada apenas pelas concentrações de Se (Figura 3 A). Para diâmetro de raiz houve interação de cultivares de repolho e concentrações de Se (Figura 3 B). O comprimento e a densidade de raiz foram influenciados pelas cultivares e concentrações de Se isoladamente (Figura 3 C e D).

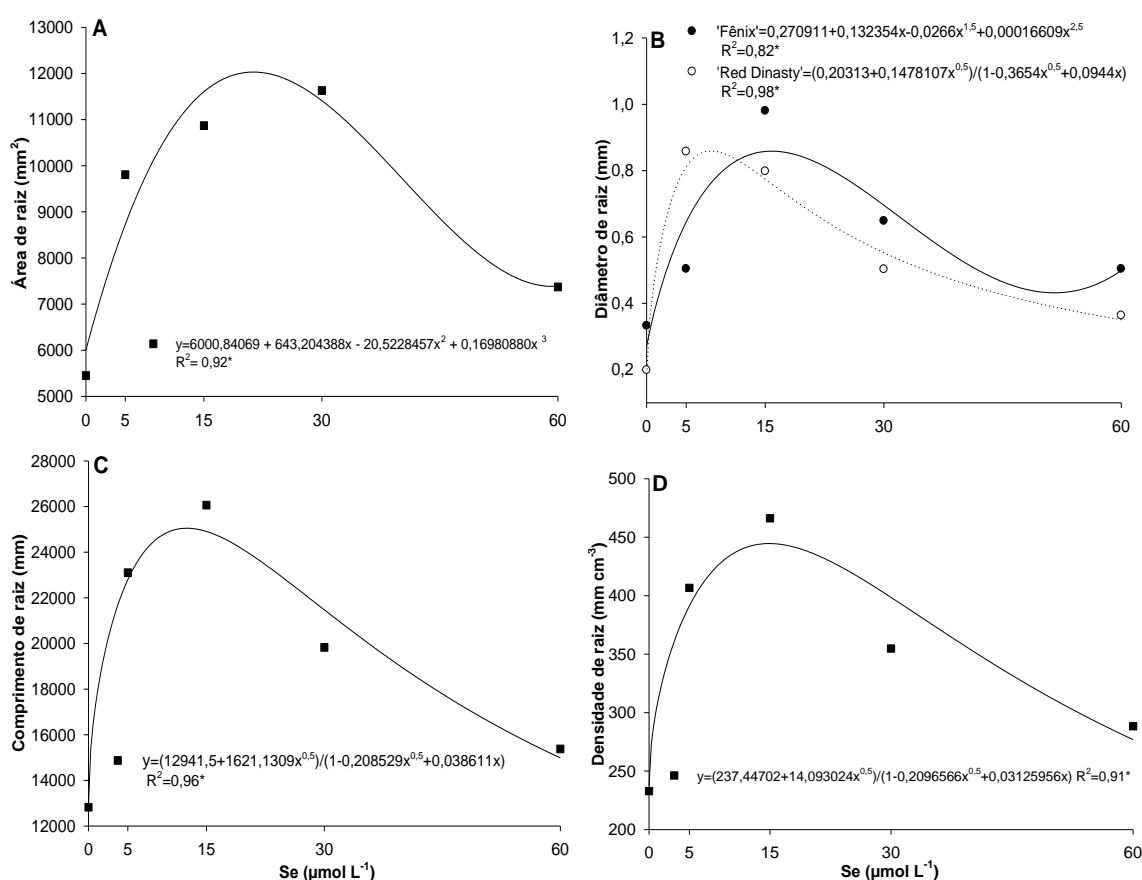


Figura 3. Área, diâmetro, comprimento e densidade radicular de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

A aplicação de Se na solução nutritiva com selenato promoveu aumentos na área, diâmetro, comprimento e densidade radicular. A maior área de raiz foi observada com $21,03 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se independente da cultivar de repolho. Verificou-se que entre as cultivares de repolho, os máximos diâmetros de raiz alcançados

foram muito similares, porém, a 'Fênix' teve o maior diâmetro com $15,82 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se enquanto 'Red Dynasty' com $8 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. A 'Red Dynasty' apresentou comprimento de raiz ($2.164,34 \text{ mm}$) e densidade radicular ($382,27 \text{ mm cm}^{-3}$) maior que a 'Fênix'. A raiz apresentou comprimento máximo ($25.051,74 \text{ mm}$) com aplicação de até $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, e densidade máxima ($444,56 \text{ mm cm}^{-3}$) com $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

3.1.3 Produtividade

A produtividade do repolho (Figura 4) foi influenciada pelas cultivares de repolho e concentrações de Se de forma isolada.

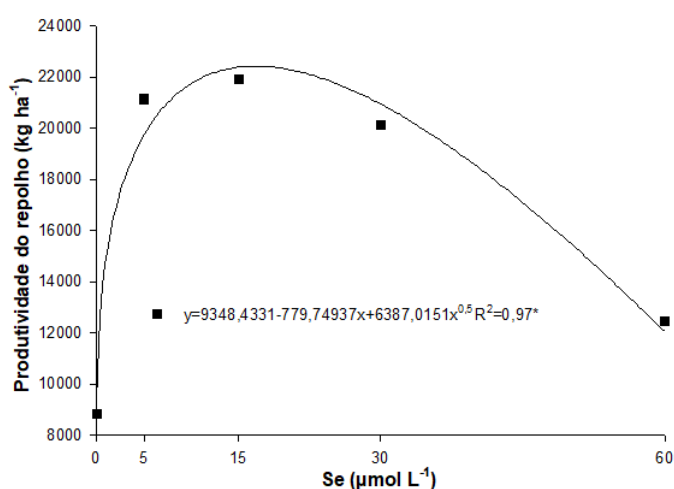


Figura 4. Produtividade do repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

A 'Fênix' foi a cultivar mais produtiva ($22.195,73 \text{ kg ha}^{-1}$) enquanto 'Red Dynasty' produziu $11.582,29 \text{ kg ha}^{-1}$ de repolho. O Se promoveu o aumento da produtividade do repolho quando aplicado na forma de selenato, sendo estimada a máxima ($22.427,62 \text{ kg ha}^{-1}$) com $16,77 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

3.1.4 Massas secas de raiz, caule e repolho

As produções das massas secas de raiz e cabeça de repolho (Figura 5 A e B) foram influenciadas pela interação entre as cultivares de repolho e concentrações de Se. A massa seca do caule foi diferente apenas entre as cultivares de repolho.

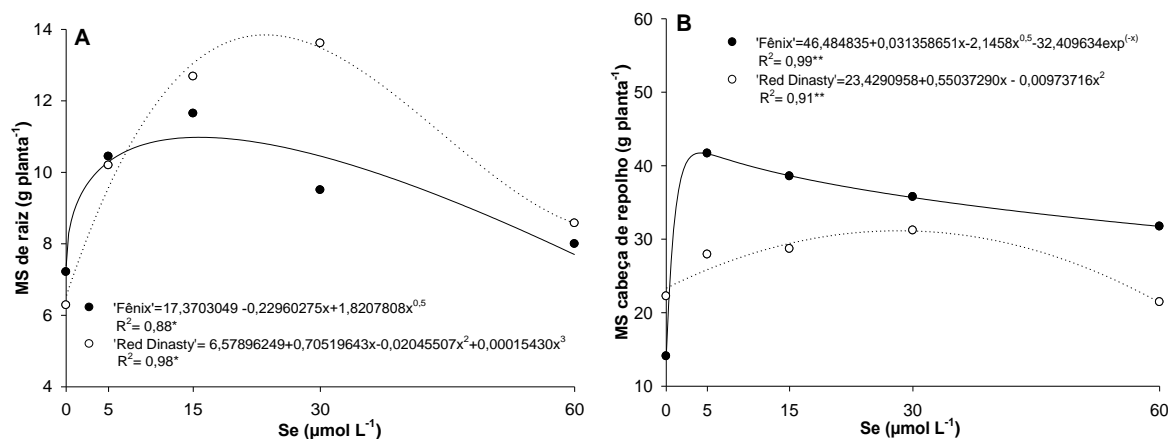


Figura 5. Massa seca (MS) de raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

O incremento de Se proporcionou aumentos nas massas de raiz e da cabeça de repolho, e após alcançadas as máximas houve redução em ambas as variáveis analisadas. A maior produção de massa seca de raiz foi obtida por 'Red Dynasty', sendo máxima com 23,4 μmol L⁻¹ de Se (13,86 g planta⁻¹). Para massa seca de cabeça de repolho, a 'Fênix' obteve maior produção (41,73 g planta⁻¹) que 'Red Dynasty' (31,20 g planta⁻¹) com as concentrações de 4,18 e 28,2 μmol L⁻¹ de Se respectivamente. A 'Fênix' apresentou maior massa seca do caule (15,76 g planta⁻¹) quando comparada a 'Red Dynasty' (9,98 g planta⁻¹).

3.1.5 Teor e acúmulo de N, P e S

O teor de N não foi influenciado pelas cultivares de repolho e pelo fornecimento de Se na solução nutritiva. O teor de P (Figura 6 A) e o acúmulo de N e S (Figura 7 A e C) apresentaram efeito para interação de cultivares de repolho e concentrações de Se. O teor de S (Figura 6 B) foi influenciado apenas pelas concentrações de Se. O acúmulo de P (Figura 7 B) foi afetado pelas cultivares de repolho e concentrações de Se isoladamente.

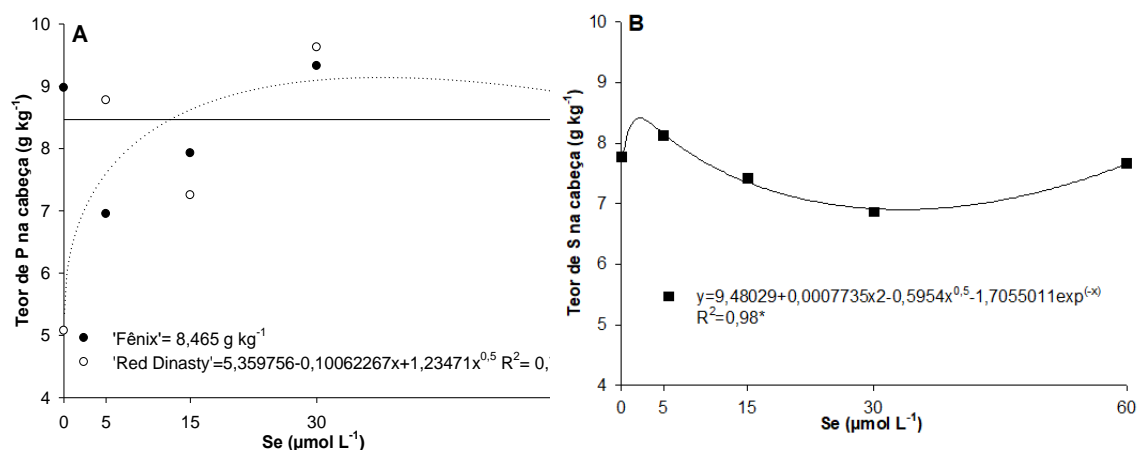


Figura 6. Teores de P e S na cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenato. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

O fornecimento de Se aumentou o teor de P apenas em 'Red Dynasty' sendo o máximo valor alcançado (9,15 g kg⁻¹) com 37,64 μmol L⁻¹ de Se. O máximo teor de S (8,41 g kg⁻¹), independente da cultivar de repolho, foi obtido com concentração baixa de Se, 2,14 μmol L⁻¹.

O incremento de Se na solução nutritiva proporcionou aumentos nos acúmulos de N, P e S. O máximo acúmulo de N (1.584,16 mg planta⁻¹) na cabeça de repolho em 'Fênix' foi estimado com aplicação de 4,15 μmol L⁻¹ de Se, sendo maior que o máximo obtido por 'Red Dynasty' (1.127,03 mg planta⁻¹) com 28,05 μmol L⁻¹ de Se. O maior acúmulo de P (269,58 mg planta⁻¹) foi observado na 'Fênix', enquanto 'Red Dynasty' apresentou 210,56 mg planta⁻¹ de P. Independente da cultivar de repolho, a concentração de 34,2 μmol L⁻¹ de Se proporcionou o máximo incremento no acúmulo de P (327,96 mg planta⁻¹). A 'Fênix' obteve o maior acúmulo de S na cabeça de repolho (327,28 mg planta⁻¹) com fornecimento de 4,03 μmol L⁻¹ de Se, enquanto a 'Red Dynasty' o máximo (223,74 mg planta⁻¹) foi proporcionado com 13,54 μmol L⁻¹ de Se.

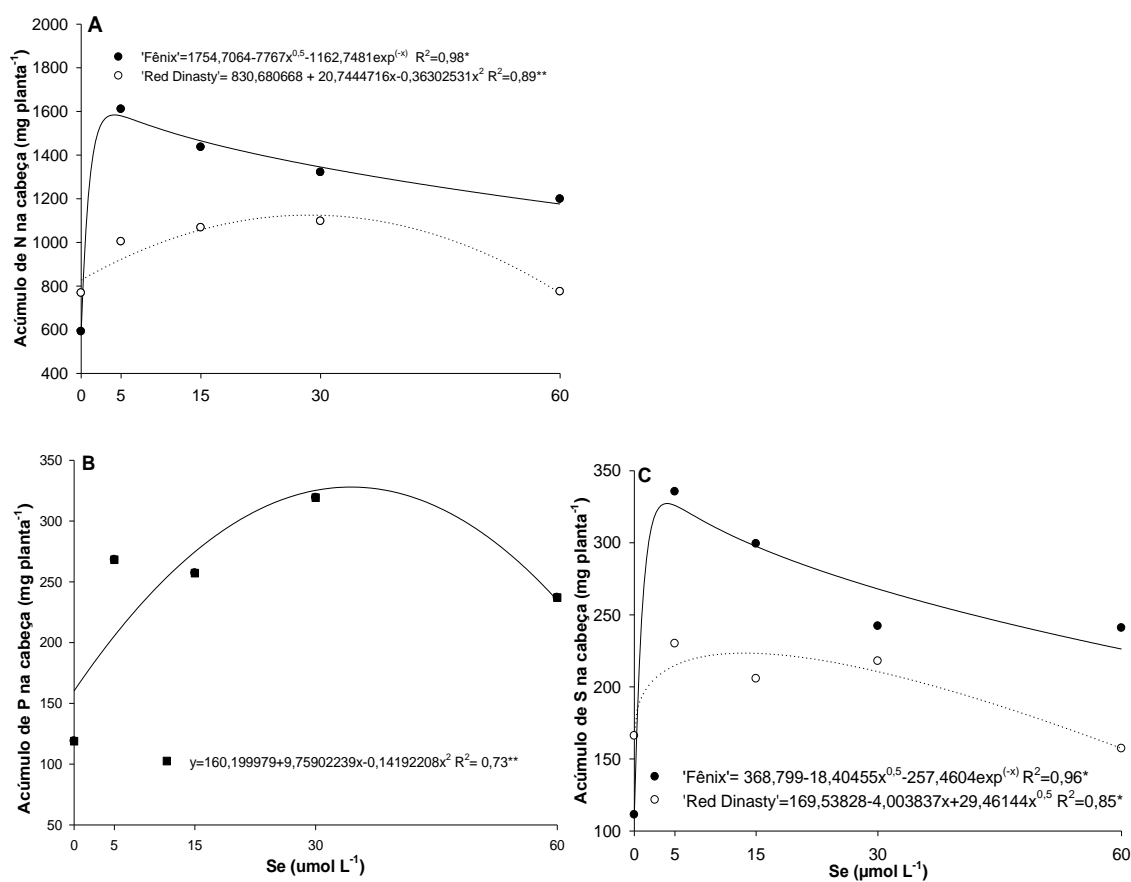


Figura 7. Acúmulos de N, P e S na cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

3.2 Experimento 2 – Se como selenito

3.2.1 Teor e acúmulo de Se

As concentrações de Se aplicadas na forma de selenito influenciaram o teor de Se na raiz (Figura 8 A) e no acúmulo de Se na cabeça do repolho (Figura 8 D). O teor de Se na cabeça do repolho e acúmulo de Se na raiz foram influenciados pela interação cultivares de repolho e concentrações de Se.

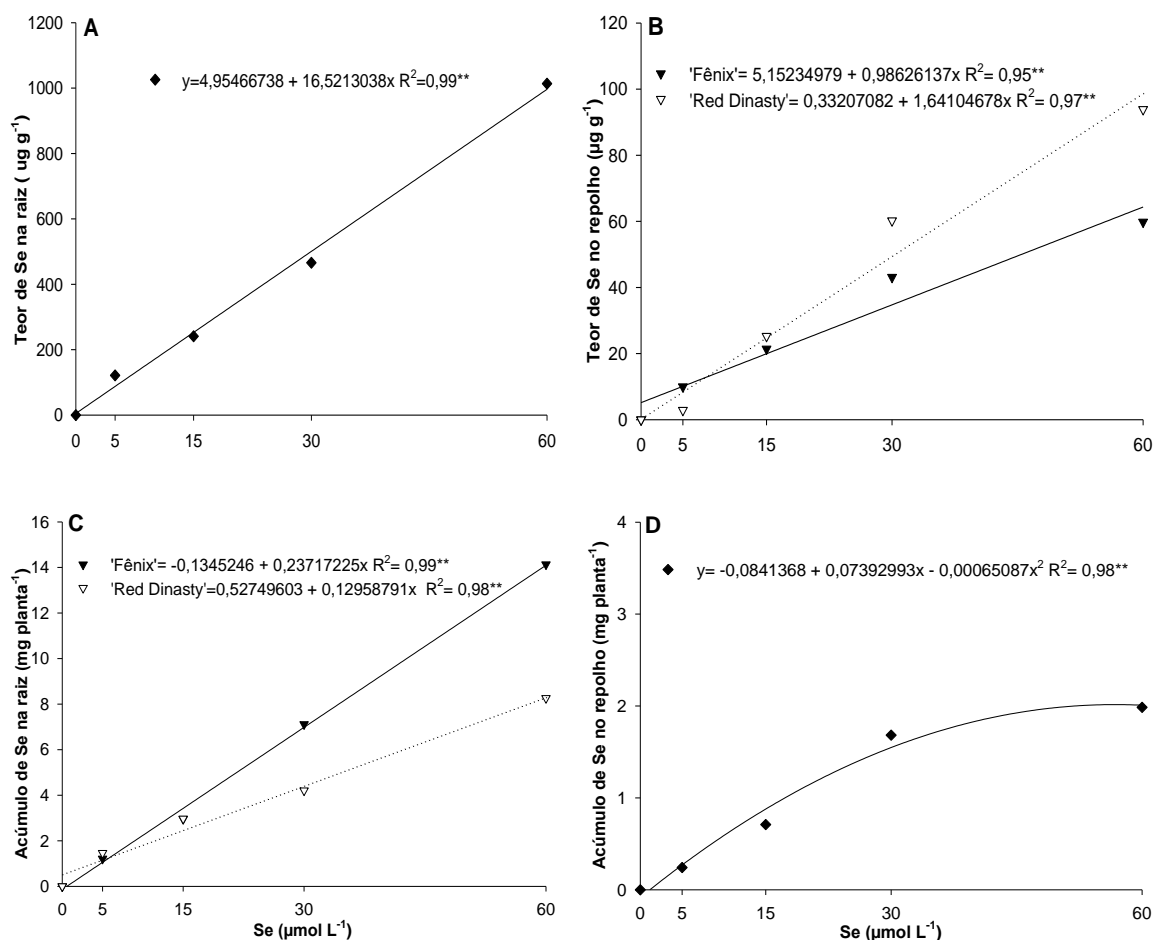


Figura 8. Teores e acúmulos de Se na raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

O máximo teor de Se na raiz ($996,23 \mu\text{g g}^{-1}$) e acúmulo de Se cabeça de repolho ($2,0 \text{ mg planta}^{-1}$) foram obtidos com $60 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Essa concentração de Se proporcionou ainda máximo teor de Se na cabeça de repolho em 'Red Dynasty' ($98,79 \mu\text{g g}^{-1}$), sendo 34,88% maior que na 'Fênix'. O maior acúmulo de Se na raiz foi estimado para 'Fênix' ($14,1 \text{ mg planta}^{-1}$) com $60 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

3.2.2 Área, diâmetro, comprimento e densidade de raiz

A área de raiz não foi influenciada pelos fatores avaliados. O diâmetro, comprimento e densidade de raiz foram afetados apenas pelas concentrações de Se (Figura 9 A, B e C).

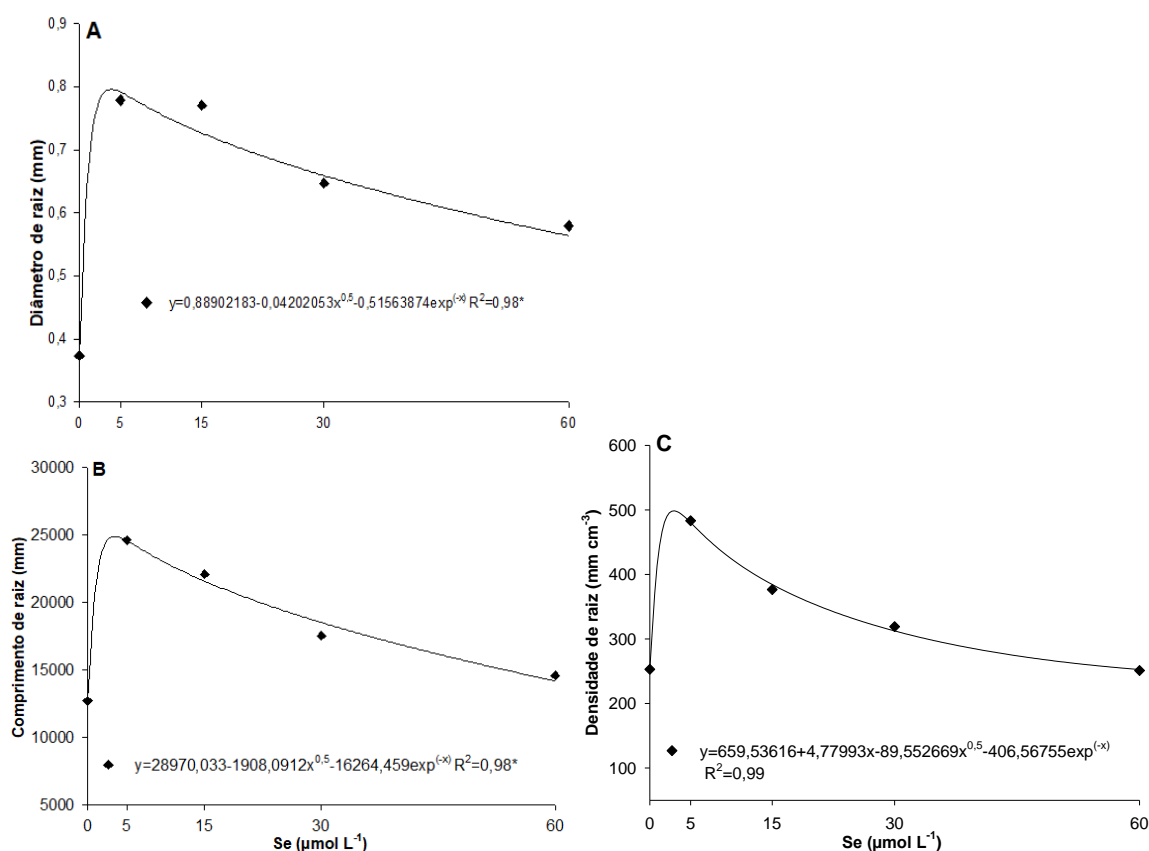


Figura 9. Diâmetro, comprimento e densidade de raiz de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

O diâmetro de raiz aumentou com a aplicação de até $3,9 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se ($0,7956 \text{ mm}$). As concentrações de $3,46$ e $2,95 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se proporcionaram valores máximos de comprimento de raiz ($24.909,59 \text{ mm}$) e densidade radicular ($498,55 \text{ mm cm}^{-3}$) respectivamente, e, após alcançado esses valores, houve redução dessas variáveis.

3.2.3 Produtividade

A produtividade do repolho com selenito foi influenciada pelos fatores cultivares de repolho e concentrações de Se de forma isolada.

A cultivar 'Fênix' foi mais produtiva que 'Red Dinasty', observando-se diferença de $12.010,252 \text{ kg ha}^{-1}$ de repolho produzido.

A máxima produtividade (21,84514 kg ha⁻¹) foi alcançada com baixa concentração de Se aplicada (7,54 μmol L⁻¹) na forma de selenito (Figura 10).

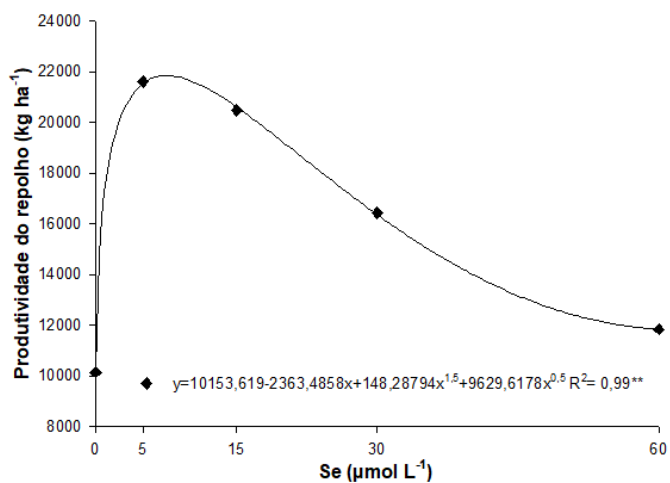


Figura 10. Produtividade do repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

3.2.4 Massas secas de raiz, caule e repolho

As massas secas de raiz e de cabeça de repolho foram influenciadas pela interação cultivares de repolho e concentrações de Se (Figura 11 A e B). A massa seca do caule apresentou diferenças entre as cultivares de repolho.

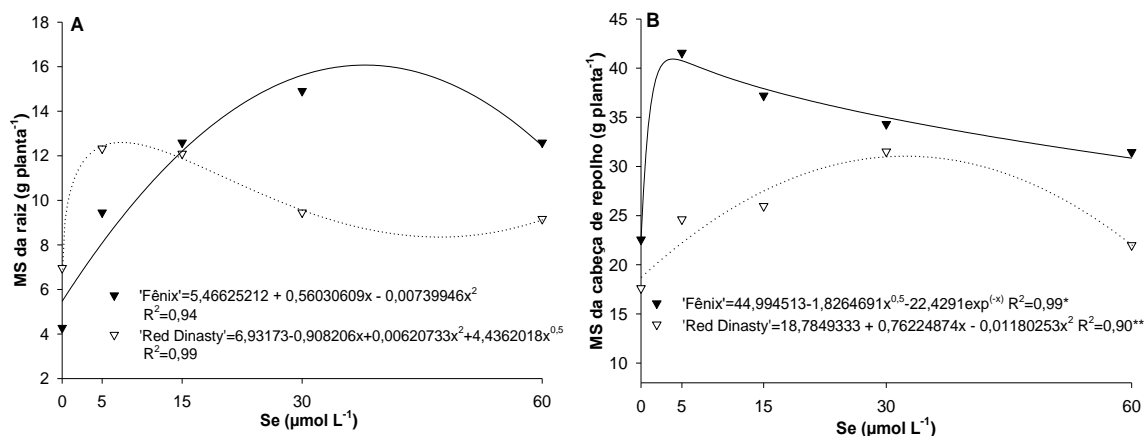


Figura 11. Massa seca (MS) de raiz e cabeça de cultivares de repolho em função de concentrações de Se na forma de selenito. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

A 'Fênix' apresentou massa seca de raiz (16,07 g planta⁻¹) superior a 'Red Dynasty' (12,61 g planta⁻¹), sendo estas obtidas com as concentrações 37,8 e 7,38

$\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, respectivamente. A 'Fênix' também apresentou a maior massa seca de cabeça de repolho ($40,93 \text{ g planta}^{-1}$) com $3,88 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, e logo em seguida houve redução com o aumento da concentração de Se, porém nenhuma massa seca foi menor que o tratamento controle. Com relação a massa seca de caule, a 'Fênix' obteve $17,75 \text{ g planta}^{-1}$, o que foi muito superior a 'Red Dynasty' ($10,52 \text{ g planta}^{-1}$).

3.2.5 Teor e acúmulo de N, P e S

O teor de N na cabeça de repolho apresentou efeito significativo somente para cultivares de repolho. O teor de P não foi influenciado por nenhum dos fatores avaliados. A interação entre as cultivares de repolho e concentrações de Se foi significativo para o teor e acúmulo de S na cabeça de repolho (Figura 12 A e D). Os acúmulos de N e P (Figura 12 B e C) apresentaram efeito para os fatores cultivares de repolho e concentrações de Se isoladamente.

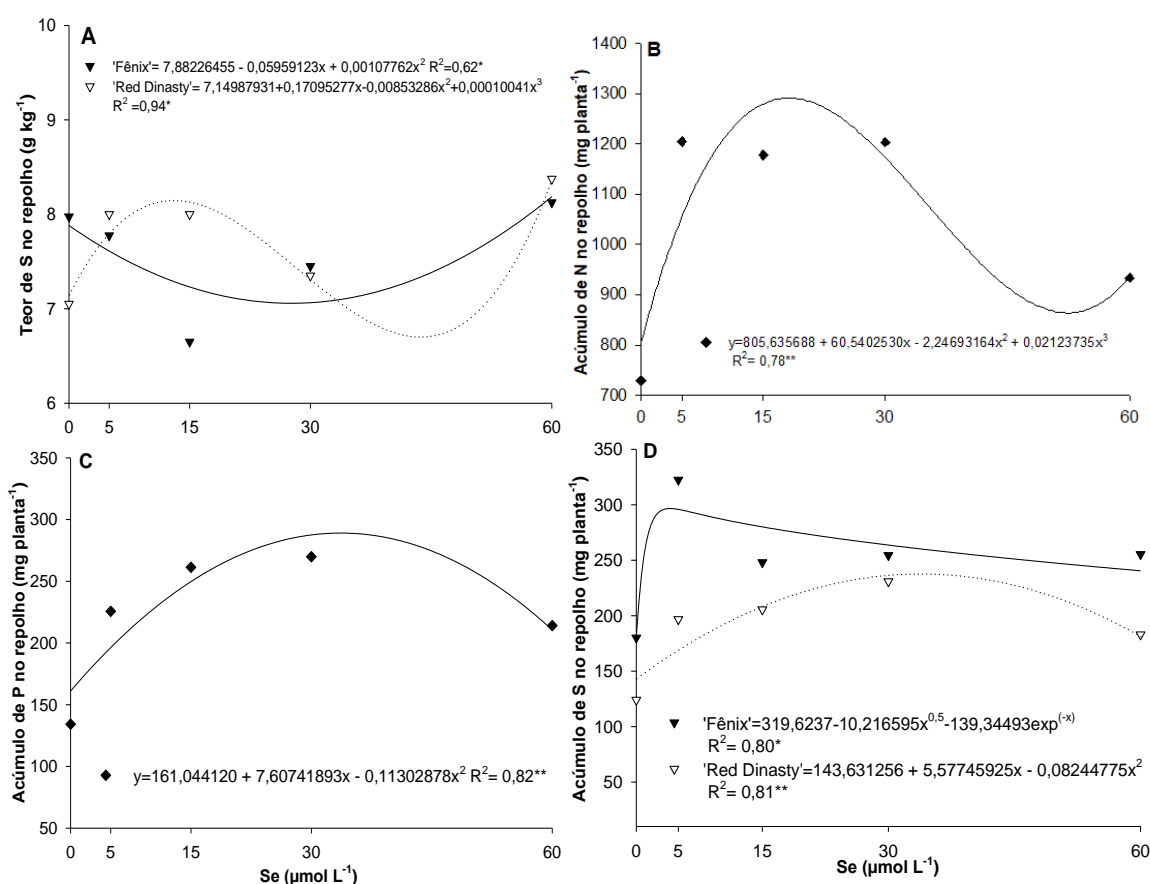


Figura 12. Teor de S e acúmulos de N, P e S na cabeça de repolho em função de concentrações de Se. * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente, pelo teste t.

O teor de N em 'Fênix' ($37,40 \text{ g kg}^{-1}$) foi superior ao de 'Red Dynasty' ($34,98 \text{ g kg}^{-1}$). Observou-se que o teor de S em 'Fênix' foi reduzido com a aplicação de Se e aumentou em 'Red Dynasty' ($8,16 \text{ g kg}^{-1}$) com até $13 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. A 'Fênix' apresentou acúmulo de N ($1.244,04 \text{ mg planta}^{-1}$) cerca de 1,5 vezes maior que 'Red Dynasty' ($855,84 \text{ mg planta}^{-1}$). Verificou-se que o máximo acúmulo de N ($1.291,21 \text{ mg planta}^{-1}$) foi obtido com a concentração de $18 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. O acúmulo de P também foi maior na 'Fênix' ($265,09 \text{ mg planta}^{-1}$), sendo este acúmulo 1,33 vez maior ao observado em 'Red Dynasty' ($176,96 \text{ mg planta}^{-1}$). A aplicação de Se na forma de selenito proporcionou aumento do acúmulo de P na cabeça de repolho, sendo máximo ($289,05 \text{ mg planta}^{-1}$) com $33,6 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. A 'Fênix' obteve maior acúmulo de S ($296,63 \text{ mg planta}^{-1}$) com $3,9 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, enquanto 'Red Dynasty' o máximo acúmulo ($237,95 \text{ mg planta}^{-1}$) foi estimado com $33,9 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

4 DISCUSSÃO

As cultivares de repolhos se mostraram responsivas ao fornecimento de Se tanto na forma de selenato como de selenito, o que proporcionou o aumento do teor de Se nos tecidos vegetais permitindo seu acúmulo nas plantas. A absorção de Se por brássicas é devido principalmente pela sua capacidade de acumular S (BROADLEY et al., 2012; GONZÁLEZ-MORALES et al., 2017), pois estes elementos apresentam semelhanças químicas, utilizando os mesmos transportadores durante a absorção pelas raízes (ZAYED; TERRY, 1992).

Conforme os resultados observou-se que a 'Red Dynasty' apresentou maior teor de Se na cabeça de repolho tanto com aplicação de selenato como na forma de selenito. Segundo Zhang et al. (2007) as espécies de plantas podem diferir consideravelmente em sua capacidade de absorver e na tolerância ao Se. E mesmo dentro de uma mesma espécie, para diferentes cultivares pode haver diferenças na absorção e acúmulo de Se, como observado neste experimento. Ramos et al. (2011) relataram que em cultivares de alface a diferença na absorção de Se, pode estar relacionada com a expressão alterada dos genes envolvidos na absorção e na assimilação de Se/S. Isso pode indicar que a 'Red Dynasty' também apresente algum mecanismo que permita a maior capacidade de absorção de Se.

Verificou-se ainda que com a aplicação de selenato, o teor de Se na cabeça de repolho é bem alto e com o fornecimento de selenito o teor é mais elevado na raiz das plantas. Isso pode ser devido o selenito ser convertido rapidamente nas raízes em compostos orgânicos que possuem baixa mobilidade no xilema, porém o selenato não possui rápida conversão, sendo muito móvel no xilema (LI et al., 2008) e acumulando mais na parte aérea das plantas.

A biofortificação das culturas consiste em aumentar o teor de determinado elemento nas partes da planta destinadas ao consumo humano, sem afetar a produtividade. O presente trabalho demonstrou que entre a não aplicação de Se e a concentração que promoveu a produtividade máxima de repolho o aumento foi de 58,32 e 53,52% com selenato e selenito, respectivamente. Verificou-se ainda que em nenhuma das concentrações de Se aplicada, houve produtividade inferior ao tratamento sem Se. Isso constata que o fornecimento de Se independente da fonte e cultivar foi benéfico, pois além de proporcionar a biofortificação incrementou a produtividade do repolho.

As concentrações mais baixas de Se (5-15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se), no entanto, são as que proporcionaram os maiores ganhos na produtividade do repolho com ambas as fontes. O Se pode ter papel fundamental na regulação de processos metabólicos e enzimáticos, incluindo a fotossíntese (HABIBI, 2013), o que pode ter contribuído para aumentar o rendimento das plantas. O efeito benéfico para as plantas pelo fornecimento de Se em baixas concentrações também foi constatado por Ramos et al. (2011) com 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se e por Rios et al. (2013) com 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Conforme Zhu et al. (2017) o aumento do rendimento com aplicação de Se é um pré-requisito para o sucesso da biofortificação, o que poderia promover ganhos na renda dos produtores.

Destaca-se que o aumento de Se na solução nutritiva promoveu incrementos na massa seca de raiz o que provavelmente foi resultante do maior crescimento radicular. Avaliar o crescimento e o desenvolvimento de raízes é importante, pois estas variáveis são imprescindíveis aos processos de absorção de água e nutrientes, sendo fundamentais para o entendimento dos sistemas de produção das culturas (TAYLOR; ARKIN, 1981). Os grandes incrementos na área, comprimento e densidade de raiz foram observados em baixas concentrações de Se com selenato e selenito. Isso pode ser resultante do efeito benéfico do Se ao sistema radicular,

permitindo que a planta apresente maior exploração do meio em que se desenvolve e com isso melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Observou-se, no entanto, que houve o engrossamento das raízes de repolho pelo incremento do diâmetro de raiz, o que pode indicar sensibilidade da raiz ao Se, com ambas as fontes de Se utilizadas. Com o aumento do diâmetro radicular, porém, ocorre redução da absorção de água e nutrientes (BONFIM-SILVA et al., 2012), o que poderia reduzir a produção das culturas. Mas, embora tenha ocorrido o aumento do diâmetro, isso provavelmente não afetou a absorção da água e nutrientes com baixas concentrações de Se. De maneira geral, o repolho apresentou bom desempenho quanto à produção da cabeça de repolho e crescimento radicular em ambas as cultivares e com as fontes de Se. A melhoria das características das raízes é importante para otimizar o manejo da adubação e irrigação, pois um desenvolvimento radicular adequado promoveria melhor nutrição e manutenção hídrica de plantas.

Conforme estudos já realizados, o Se poderia apresentar duplo efeito na nutrição mineral das plantas, podendo estimular ou mesmo inibir a absorção de nutrientes essenciais. O Se, no entanto, pode causar um desequilíbrio na nutrição da planta e conseqüentemente afetar a produção da cultura biofortificada, uma vez que o crescimento e o desenvolvimento das plantas dependem da absorção de macro e micronutrientes. Com relação ao teor de N na cabeça do repolho o fator genético provavelmente é a principal causa para o maior teor em 'Fênix', no experimento com selenito.

Neste trabalho, verificou-se que o selenato apresentou sinergismo com o P em 'Red Dynasty', pois o Se promoveu o aumento do teor de P, enquanto que com selenito o teor de P não foi alterado em ambas cultivares. Conforme Hopper e Parker (1999), o selenito e o fosfato competem entre si, pois compartilham das mesmas vias de entradas. O que se esperava é que houvesse um efeito antagônico do selenito com o P, pois a assimilação do selenito é mediada por transportadores de fosfato (ZHANG et al., 2014; SONG et al., 2017) e com isso os dois ânions competiriam entre si e reduziria a absorção de P.

Com fornecimento de selenato, a baixa concentração de Se proporcionou pequeno incremento no teor de S na cabeça de repolho, o que foi reduzido logo em seguida com teores inferiores ao tratamento controle. Com selenito observou-se

efeito antagônico para S na 'Fênix' devido à redução do teor na cabeça de repolho, porém houve efeito sinérgico, pois aumentou do teor de S em 'Red Dynasty'. Verificase que sulfato e o selenato competem entre si pelos mesmos transportadores de absorção (MALAGOLI et al., 2015), sendo que o Se substitui o S em compostos orgânicos como a cisteína e a metionina, formando os análogos selenocisteína e selenometionina (SORS et al., 2005). Porém, o antagonismo entre selenato e sulfato geralmente é relatado em plantas quando altas quantidades de selenato ou sulfato são usados (LYI et al., 2005). Contudo, de acordo com Boldrin et al. (2012), Mikkelsen e Wan (1990) a interação sinérgica entre o selenato e o sulfato pode ocorrer em diversas espécies vegetais.

5 CONCLUSÃO

A 'Red Dynasty' é a cultivar com maior potencial para absorver Se com fornecimento tanto de selenato como de selenito.

O selenato é a fonte mais indicada para biofortificação, pois proporciona maior incremento no teor de Se na cabeça de repolho.

A concentração de 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se promove os melhores resultados incrementando a produtividade do repolho, o crescimento de raízes e absorção de P e S na cabeça de repolho.

6 REFERÊNCIAS

ALAEJOS, M. S.; ROMERO, F. J. D.; ROMERO, C. D. Selenium and cancer: some nutritional aspects. **Nutrition**, New York, v. 16, n. 5, p. 376-383, 2000.

AMBRÓGI, J. B.; AVEGLIANO, R. P.; MAIHARA, V. A. Essential element contents in food groups from the second Brazilian total diet study. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 307, p. 2209–2216, 2016.

ARO, A.; ALFTHAN, G.; VARO, P. Effects of supplementation of fertilizers on human selenium status in Finland. **Analyst**, v.120, n.3, p. 841-843, 1995.

ARVY, M. P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). **Journal of Experimental Botany**, v. 44, p. 1083–1087, 1993.

ÁVILA, F. W.; YANG, Y.; FAQUIN, V.; RAMOS, S. J.; GUILHERME, L. R. G.; THANNHAUSER, T. W.; LI, L. Impact of selenium supply on Se-methylselenocysteine and glucosinolate accumulation in selenium-biofortified *Brassica* sprouts. **Food Chemistry**, London, v. 165, p. 578–586, 2014.

BAJAJ, M.; EICHE, E.; NEUMANN, T.; WINTER, J.; GALLERT, C. Hazardous concentrations of selenium in soil and groundwater in North-West India. **Journal of Hazardous Materials**, v. 189, n. 3, p. 640-646, 2011.

BALISTRERI, L. S.; CHAO, T. T. Selenium adsorption by goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p. 1145-1151, 1987.

BAÑUELOS, G. S.; ARROYO, I.; PICKERING, I. J.; YANG, S. I.; FREEMAN, J. L. Selenium biofortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator *Stanleya pinnata*. **Food Chemistry**, v. 166, p. 603–608, 2015.

BARBOSA, J. C.; MALDONATO JÚNIOR, W. **Experimentação Agronômica e Agroestat – Sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. 1. ed. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2015.

BARILLAS, J. R. V.; QUINN, C.F.; PILON-SMITS, E. A. Selenium accumulation in plants—phytotechnological applications and ecological implications. **International of Journal Phytoremediation**, v.13, p. 166-178, 2011.

BOARETTO, L. F.; CARVALHO, G.; BORGIO, L.; CRESTE, S.; LANDELL, M. G. A.; MAZZAFERA, P.; AZEVEDO, R. A. Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, New Delhi, v. 74, p. 165–175, 2014.

BODNAR, M.; KONIECZKA, P.; NAMIESNIK, J. The properties, functions, and use of selenium compounds in living organisms. **Journal of Environmental Science and Health Part**, v.30, n. 3, p. 225–252, 2012.

BOLDRIN, P.F.; FAQUIN V.; RAMOS S. J.; GUILHERME L. R.G.; BASTOS C. E.A.; CARVALHO, G.S.; COSTA, E.T.S. Selenato e selenito sobre produção e biofortificação agrônômica com selênio em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 47, n.6, p.831–837, 2012.

BONFIM-SILVA, E. M.; SANTOS, C. C.; FARIAS, L. N.; VILARINHO, M. K. C.; GUIMARÃES, S. L.; SILVA, T. J. A. Características morfológicas e produtivas do capim-marandu adubado com fosfato natural reativo em solo de cerrado. **Revista Agro@ambiente on line**, Boa Vista, v. 6, n. 2, p. 166-171, 2012.

BOSMA, A. A.; HAAN, N. A.; BLOUCH, R. A.; MACDONALD, A. A. Comparative cytogenetic studies in *Sus verrucosus*, *Sus celebensis* and *Sus scrofa vittatus* (Suidae, Mammalia). **Genetica**, Gravenhage, v. 83, n. 3, p. 189-194, 1991.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; M. A. J. F.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Beneficial elements. In: Marschner P, editor. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, Cambridge, p. 249-269, 2012.

BUTTERMAN, W. R.; BROWN, R. D. **Selenium. Mineral Commodity Profiles**. US Department of the Interior, US Geological Survey, Arlington, VA, 2004.

CARDOSO, B. R.; ROBERTS, B. R.; BUSH, A. I.; HARE, D. J. **Selenium, selenoproteins and neurodegenerative diseases**. *Metallomics*, v.7, n. 8, p. 1213-1228, 2015.

CARTES, P.; GIANFREDA, L.; PAREDES, C.; MORA, M. L. Selenium uptake and its antioxidant role in ryegrass cultivars as affected by selenite seed pelletization. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 11, p. 1-14. 2011.

CARVALHO, R. I. N.; IKUTA, A. R. Y. Competição entre cultivar e híbridos de repolho no município de Piraquara, PR. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p. 33-36, 2003.

CARYA, L.; NAVEAUB, A.; MIGEOTC, V.; RABOUANC, S.; CHARLETD, L.; FORAYE, N. SÉBYF, F.; BUENOG, M.; JURYH, C.; PARMENTIERA, M.; LOUART, J. From water-rock interactions to the DNA: a review of selenium issues. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 17, p.698 – 701, 2017.

CHAPMAN. M.; ADAMS, W. J.; BROOKS, M. L.; DELOS, C. G.; LUOMA, S. N.; MAHER, W.A.; OHLENDORF, H. M.; PRESSER T. S.; SHAW D. P. Ecological assessment of selenium in the aquatic environment. **Society of Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 1, n. 4, p. 1-35, 2009.

CHEN, Y., H.Z. MO, L.B. HU, Y.Q. LI, J. CHEN, L.F. YANG. **The endogenous nitric oxide mediates selenium-induced phytotoxicity by promoting ROS generation in *Brassica rapa***. **PLoS One**, São Francisco, v.9, n.10, p. 109-115, 2014.

CHILIMBA, A. D. C.; YOUNG, S. D.; BLACK, C. R.; ROGERSON, K. B.; ANDER, E. L.; WATTS, M. J. Maize grain and soil surveys reveal suboptimal dietary selenium intake is widespread in Malawi. **Scientific Reports**, v. 1, p. 1–9, 2011.

CNS. Chinese nutrition society, recommended daily dietary nutrient supply. *Acta Nutrimenta Sinica* 12(1):1–9 Combs GF (2001) Selenium in global food systems. **British Journal Nutrition**, v. 85, n.5, p.517–547, 1990.

COMBS JUNIOR, G. F. Selenium in global food systems. **British Journal of Nutrition**, v. 85, p. 517-547, 2001.

COMINETTI, C.; COZZOLINO, S. M. F. **Funções plenamente reconhecidas de nutrientes: selênio**. São Paulo: ILSI, 2009. 24p.

COOPER, W. C.; BENNETT, K. G.; CROXTON, F. The history, occurrence, and properties of selenium. In: ZINGARO, R. A.; COOPER, W. C. (Ed.). *Selenium*. New York: V. N. Reinhold, p. 517-547, 1970.

DHILLON, K. S.; DHILLON, S. K. Selenium accumulation by sequentially grown wheat and rice as influenced by gypsum application in a seleniferous soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 227, p. 243–248, 2000.

DHILON, K.S.; DHILON, S.K. Selenium in groundwater and its contribution towards daily dietary Se intake under different hydrogeological zones of Punjab, India. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 615-626, 2016.

DIMKOVIKJ, A.; FISHER, B.; HUTCHISON, K.; HOEWYK, D. V. Stuck between a ROS and a hard place: Analysis of the ubiquitin proteasome pathway in selenocysteine treated *Brassica napus* reveals different toxicities during selenium assimilation. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 181, p. 50-54, 2015.

DOLGOVA, N. V.; HACKETT, M. J.; MACDONALD, T. C.; NEHZATI, S.; JAMES, A. K.; KRONE, P. H.; GEORGE, G. N.; PICKERING, I. J. Distribution of selenium *in* zebrafish larvae after exposure to organic and inorganic selenium forms. **Metallomics**, v. 8, n. 3, p. 305-12, 2016.

DUMA, M.; ALSINA, I.; DUBOVA, L.; STROKSA, L.; SMILTINA, Z. The effect of sodium selenite and selenate on the quality of lettuce. In: Conference Proceedings of the 6th Baltic Conference on Food Science And Technology. **FOODBALT**. 2011, Jelgava, Latvia.

DUMONT, E.; VANHAECKE, F.; CORNELIS, R. Selenium speciation from food source to metabolites: a critical review. **Analytical Bioanalytical Chemistry**, v. 385, p. 1304–1323, 2006.

DUNTAS, L. H.; BENVENGA, S. Selenium: An element for life. **Endocrine**, v. 48, n. 3, p. 756–775, 2015.

EL KASSIS, E.; CATHALA, E.; ROUACHED, H.; FOURCROY, P.; BERTHOMIEU, P.; TERRY N.; DAVIDIAN, J-C. Characterization of a selenate-resistant *Arabidopsis* mutant. Root growth as a potential target for selenate toxicity. **Plant Physiology**, v.143, p. 1231–1241, 2007.

EL MEHDAWI, A.F.; J.J. CAPPA, S.C. FAKRA, J. SELF, E.A. PILON-SMITS. Interactions of selenium hyperaccumulators and nonaccumulators during cocultivation on seleniferous or nonseleniferous soil—the importance of having good neighbors. **New Phytologist**, v.194, p. 264-277, 2012.

EL MEHDAWI, A.F.; S.D. LINDBLOM, J.J. CAPPA, S.C. FAKRA, E.A. PILON-SMITS. Do selenium hyperaccumulators affect selenium speciation in neighboring plants and soil? An X-ray microprobe analysis. **International of Journal Phytoremediat**, 17, p. 753-765, 2015.

EFSA. European Food Safety Authority. Scientific Opinion on Dietary Reference Values for selenium. **EFSA Journal**, v. 12, n. 10, p. 1–67, 2014.

FAIRWEATHER-TAIT S. J. Bioavailability of selenium. **European Journal of Clinical Nutrition**, Jan;51 Suppl 1:S20-3, 1997.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2017**. Building resilience for peace and food security. Rome, FAO. p. 1-30. 2017.

FERREIRA, K. S.; GOMES, J. C.; BELLATO, C. R.; JORDÃO, C. P. Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. Revista **Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health**, Washington, v. 11, n. 3, p. 172–177, 2002 2002. 2002.

FERREIRA, W. R.; RANAL, M. A.; FILGUEIRA, F. A. R. Fertilizantes e espaçamento entre plantas na produtividade da couve-da-Malásia. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n.4, p.635-640, 2002.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, 2008. p. 279-299.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2003. 412 p.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2000. 402 p.

FINLEY, J. W. Bioavailability of Selenium from Foods., **Nutrition Reviews**, v. 64, n. 3, p.146–151, 2006.

FINLEY, J. W.; SIGRID-KECK, A.; ROBBINS, R. J.; HINTZE, K. J. Selenium Enrichment of Broccoli: Interactions between Selenium and Secondary Plant Compounds.translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **The Journal of nutrition**, Rockville, v.135, n.5, p.1236-1238, 2005.

FISHBEIN, L. II 25 selenium. In: MERIAN, E. (Ed.). Metals and their compounds in the environment:occurrence, analysis, and biological relevance. New York: VCH Weiheim, 1991. p. 1153-1190.

FONTAGNÉ-DICHARRY, S.; GODIN, S.; HAOKUN L.; PRABHU, P. A. J.; BRICE BOUYSSIÈRE, B.; BUENO, M.; TACON, P.; MÉDALE, F.; KAUSHIK, S. J. Influence of the forms and levels of dietary selenium on antioxidant status and oxidative stress-related parameters in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry. v. 113, n. 12, p. 1876-1887, 2015.

FONTANÉTTI A.; CARVALHO, G. J.; GOMES, L. A. A.; ALMEIDA, K.; MORAES, S. R. G.; TEIXEIRA, C. M. Adubação verde na produção orgânica de alface americana e repolho. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, p. 146-150, 2006.

FORDYCE, F.M. **Selenium deficiency and toxicity in the environment**. O. Selinus, et al. (Eds.), *Essentials of Medical Geology* (revised ed.) (2013), p. 375-416, 2013.

GIGOLASHVILI, T.; KOPRIVA, S. Transporters in plant sulphur metabolism. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 422, 2014.

GODIN, S.; FONTAGNÉ-DICHARRY, S.; BUENO, M.; TACON, P.; PRABHU, P. A. J.; KAUSHIK, S.; MÉDALE, F.; BOUYSSIÈRE, B. Influence of Dietary Selenium Species on Selenoamino Acid Levels in Rainbow Trout. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 28, p. 6484-6492, 2015.

GOLOB, A.; GADZOB, D.; STIBILJC, V.; DJIKICB, M.; GAVRICB, T.; KREFTD, I.; GERM, M. Sulphur interferes with selenium accumulation in Tartary buckwheat plants. **Plant Physiology Biochemistry**, Rockville Pike, v. 108, p. 32-36, 2016.

GONZÁLEZ-MORALES, S.; PÉREZ-LABRADA, F.; GARCÍA-ENCISO, E. L.; LEIJAMARTÍNEZ, P.; MEDRANO-MACÍAS, J.; DÁVILA-RANGEL, I. E.; JUÁREZ-MALDONADO, A.; RIVAS-MARTÍNEZ, E. N.; BENAVIDES-MENDOZA, A. Selenium and sulfur to produce allium functional Crops. *Molecules*, v. 22, p. 1-22, 2017.

GUPTA, M.; GUPTA, S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. **Frontier in Plant Science**, v. 7, n. 2074, p. 1-14, 2017.

HABIBI, G. Effect of drought stress and selenium spraying on photosynthesis and antioxidant activity of spring barley. **Acta Agriculturae Slovenica**, Ljubljana, v. 101, p.31-39, 2013.

HARRIS, G. A.; CAMPBELL, G. S. Automated quantification of roots using a simple image analyzer. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 935-938, 1989.

HARRIS, J., SCHNEBERG, K. A., AND PILON-SMITS, E. A. H. Sulfur—selenium—molybdenum interactions distinguish selenium hyperaccumulator *Stanleya pinnata* from non-hyperaccumulator *Brassica juncea* (*Brassicaceae*). **Planta**, v. 239, p.479–491, 2014.

HAUSER-DAVIS, R. A.; SILVA, J. A. N.; RAFAEL, C. C.; ROCHA, T. SAINT'PIERRE, R.L.Z.; Riolli Arruda, M.A.Z. Acute selenium selenite exposure effects on oxidative stress biomarkers and essential metals and trace-elements in the

model organism zebrafish (*Danio rerio*). **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 33, p. 68-72, 2016.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experiment Station Circular**, Berkeley, v. 347, n. 347, p. 1–32, 1950.

HOPPER, J. L.; PARKER, D. R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate. **Plant and Soil**, The Hague, v. 210, n. 2, p. 199–207, 1999.

HOPPER, J. L.; PARKER, D. R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate. **Plant and Soil**, The Hague, v. 210, n. 2, p. 199–207, 1999.

HSIEH, H. S.; GANTHER, H. E. Acid-volatile selenium formation catalyzed by glutathione reductase. **Biochemistry**, v. 14, n. 8, p. 1632-1636, 1975.

HUANG, Z.; ROSE, A. H.; HOFFMANN, P. R. The Role of Selenium in Inflammation and Immunity: From Molecular Mechanisms to Therapeutic Opportunities. **Antioxidants & Redox Signaling**, v. 16, n. 7, p. 705-743, 2012.

HURSKY, O.; PIETROCK, M. Intestinal nematodes affect selenium bioaccumulation, oxidative stress biomarkers, and health parameters in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Environmental Science Technology**, v.17, n. 49, n. 4, p. 2469-2476, 2015.

HURST, R.; SIYAME, E. W, YOUNG, S. D.; CHILIMBA, A. D.; JOY, E. J.; BLACK, C. R.; ANDER, E. L.; WATTS, M. J.; CHILIMA, B.; GONDWE, J.; KANG'OMBE, D.; STEIN, A. J.; FAIRWEATHER-TAIT, S.J.; GIBSON, R. S.; KALIMBIRA, A. A.; BROADLEY, M. R. Soil-type influences human selenium status and underlies widespread selenium deficiency risks in Malawi. **Scientific Report**, v. 3, p.1-12, 2013.

Institute of Medicine (US) Subcommittee on Interpretation and Uses of Dietary Reference Intakes; Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. DRI Dietary Reference Intakes: Applications in Dietary Assessment. Washington (DC): National Academies Press (US); 2000.

JEŽEK P, ŠKARPA P, LOŠÁK T, HLUŠEK J, JŮZL M, ELZNER P. Selenium – An Important Antioxidant in Crops Biofortification. In: El-Missiry MA. Antioxidant Enzyme. Biochemistry. **Genetics and Molecular Biology**. p. 343-368, 2012.

KHALIQ, A.; ASLAM, F.; MATLOOB, A.; HUSSAIN, S.; GENG, M.; WAHID, A.; UR REHMAN, H. Seed priming with selenium: consequences for emergence, seedling growth, and biochemical attributes of rice. **Biological Trace Element Research**, v. 166, p. 236–244, 2015.

KHATTAB, H. Metabolic and oxidative responses associated with exposure of *Eruca sativa* (rocket) plants to different levels of selenium. **International Journal of Agriculture Biology**, v. 6, p.1010–1106, 2004.

KIPP, A. P.; STROHM, D.; BRIGELIUS-FLOHÉ, R.; SCHOMBURG, L.; BECHTHOLD, A.; LESCHIK-BONNET, E.; HESEKER, H. Revised reference values for selenium intake. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v. 32, p. 195-199, 2015.

KUMAR N, DUBEY AK, JAISWAL PK, SAHU N, BEHERA SK, TRIPATHI RD, et al. Selenite supplementation reduces arsenate uptake greater than phosphate but compromises the phosphate level and physiological performance in hydroponically grown *Oryza sativa* L. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, p. 163-172, 2016.

KUROKAWA, S.; BERRY M. J. Selenium. Role of the essential metalloid in health. **Metal Ions in Life Sciences**, v.13, p. 499–534, 2013.

LANA, M. M., TAVARES, S. A. Editores técnicos. 50 hortaliças: como comprar, conservar e consumir. 2010. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças.

LÉDO, F.J.S.; SOUZA, J.A.; SILVA, M.R. Avaliação de cultivares e híbridos de repolho no Estado do Acre. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, n.2, p.138-140, 2000.

LEMIRE, M.; PHILIBERT, A.; FILLION, M.; PASSOS, C. J. S.; GUIMARÃES, J. R. D.; BARBOSA JR. D.; MERGLER, D. No evidence of selenosis from a selenium-rich diet in the Brazilian Amazon. **Environment International**, v. 40, p. 128-136, 2012.

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

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

LI, S. H.; XIAO, T. F.; ZHENG, B. S. Medical geology of arsenic, Se and thallium in China. **Science of the Total Environment**, v.421–422, p. 31–40, 2012.

LI, X.; BOQUN, LI.; YANG, Y. Effects of Foliar Selenite on the Nutrient Components of Turnip (*Brassica rapa* Var. *rapa* Linn.). **Frontiers in Chemistry**, v. 6, n. 42, p. 1-7, 2018.

LIU, X.; ZHAO, Z.; DUAN, B.; H. U. C.; ZHAO, X.; GUO, Z. Effect of applied sulphur on the uptake by wheat of selenium applied as selenite. **Plant and Soil**, The Hague, v. 386, p. 35-45, 2015.

LYI, S. M.; HELLER, LI.; RUTZKE, M.; WELCH, R. M.; KOCHIAN, L. V.; LI, L. Molecular and Biochemical Characterization of the Selenocysteine Se-Methyltransferase Gene and Se-Methylselenocysteine Synthesis in Broccoli. **Plant Physiology**, New Delhi, v.135, p. 409-420, 2005.

MACFARQUHAR, J. K.; BROUSSARD, D.L.; MELSTROM, P.; HUTCHINSON, R.; WOLKIN, A.; MARTIN, C.; BURK, R. F.; DUNN, J. R.; GREEN, A. L.; HAMMOND, R.; SCHAFFNER, W.; JONES, T. F. Acute selenium toxicity associated with a dietary supplement. **Archive of International Medicine**, v. 170, p. 256-261, 2010.

MAIER, K. J.; KNIGHT, A. W. Ecotoxicology of selenium in freshwater systems. **Review Environmental Contaminant Toxicology**, v. 134: p. 31-48, 1994.

MAIHARA, V. A.; GONZAGA, V. I.; SILVA, V. I., FAVARO, D. I. T., VASCONCELLOS, M. B. A.; COZZOLINO, S. M. F. Daily dietary selenium intake of selected Brazilian population groups. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 259, p. 465–468, 2004.

MALAGOLI, M.; SCHIAVON, M.; DALL'ACQUA, S.; PILON-SMITS, E.H. Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. **Frontiers in plant science**, London, v. 6, n. 280, p. 1-5, 2015.

MARTENS, A.; COZZOLINO, S. M. F. Mapeamento da distribuição de selênio em território brasileiro por meio da análise de alimentos nativos: feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e carne bovina para o consumo humano e águas e solos oriundos. Relatório Científico encaminhado a Fapesp. Processo nº 00/ 11578-3,2002.

MARTENS, I.; CARDOSO, B. H. A. D.; NIEDZWIECKI, M.; LAJOLO, F.; MARTENS, A.; COZZOLINO, S. Nutritional Status of Selenium in Preschool Children Receiving A Brazil Nut-Enriched Diet. **Nutrition**, v. 31, p. 1339-1343, 2015.

MEHDI, Y.; HORNICK, J. L.; ISTASSE, L.; DUFRASNE, I. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. **Molecules**, v.18, n. 3, p. 3292-3311, 2013.

MEPLAN, C.; HESKETH, J. Selenium and cancer: A story that should not be forgotten-insights from genomics. **Cancer Treatment and Research**, v.159, p. 145-166, 2014.

MÉPLAN, C.; HESKETH, J. The influence of selenium and selenoprotein gene variants on colorectal cancer risk. **Mutagenesis**, v. 27, n. 2, p. 177–186, 2012.

MIKKELSEN, R.L.; WAN, H.F. The effect of selenium on sulfur uptake by barley and rice. **Plant and Soil**, The Hague, v.122, p. 151-153, 1990.

MIRLEAN, N.; SEUS-ARRACHE, E. R.; VLASOVA, O. Selenium deficiency in subtropical littoral pampas:environmental and dietary aspects. **Environmental Geochemistry Health**, v. 40, p.543–556, 2018.

MISRA, S.; PEAK, D.; CHEN, N.; HAMILTON, C.; NIYOGI, S. Tissue-specific accumulation and speciation of selenium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to elevated dietary selenomethionine. Comparative biochemistry and physiology. **Toxicology & pharmacology**, v. 155, n. 4, p. 560-568, 2012.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. de. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. DA (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. p. 191–233.

NAVARRO-ALARCON, M.; CABRERA-VIQUE, C. Selenium in food and the human body: A review. **Science of the Total Environment**, Granada, v. 400, n. 1-3, p. 115-141, 2008.

NAWAZ F., AHMAD R., ASHRAF M. Y., WARAICH E. A., KHAN S. Z. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. **Ecotoxicology Environmental Safety**. v. 113, p. 191–200, 2015.

NEAL, R. H. Selenium. In: ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. 2.ed. New York, Wiley, 1995. p.260-283.

NEUHIERL, B.; BÖCK, A. On the mechanism of selenium tolerance in selenium-accumulating plants: purification and characterization of a specific selenocysteine methyltransferase from cultured cells of *Astragalus bisulcatus*. **Europe Journal Biochemistry**, v. 239, p. 235–238, 1996.

NOCTOR, G.; MHAMDI, A.; CHAOUCH, S.; HAN, Y.; NEUKERMANS, J.; MARQUEZ-GARCIA, B.; QUEVAL G.; FOYER, C. H. Glutathione in plants: an integrated overview.. **Plant Cell and Environment**, v. 35, p. 454–484, 2012.

OANCEA A, CRACIUNESCU O, GASPAR A, MOLDOVAN L, SECIU AM, UTOIU, E.; GEORGESCU, F.; TURCU, D. Chemopreventive functional food through selenium biofortification of cauliflower plants. **Studia Universitatis "Vasile Goldis"**, Aria, v. 26, n. 2, p. 207-213, 2016.

PANG, W.; KIM, Y-Y.; LI, X.; CHOI, S. R.; WANG, Y.; SUNG, C-K.; IM, S.; RAMCHIARY, N.; ZHOU, G.; LIM, Y. P. Anatomic Characteristics Associated with Head Splitting in Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). **PLoS ONE**, São Francisco, v. 10, n. 11, p. 1-12, 2015.

PAPP, V.; LU, L. V. J.; HOLMGREN, A.; KHANNA, K. K. From selenium to selenoproteins: synthesis, identity, and their role in human health. **Antioxid Redox Signal**, v.9, n. 7, p. 775-806, 2007.

PIL, Y.; CESCO, S.; MIMMO, T. Shoot ionome to predict the synergism and antagonism between nutrients as affected by substrate and physiological status. **Plant Physiology and Biochemistry**, New Delhi, v. 94, p. 48–56, 2015.

PILON-SMITS, E. A. H.; QUINN, C. F. **Selenium metabolism in plants**, in Cell Biology of Metals and Nutrients. Plant Cell Monographs 17, eds Hell R., Mendel P. R., editors. (Heidelberg: Springer-Verlag), p. 225–251, 2010.

PILON-SMITS, E. A. H. Selenium in Plants. LÜTTGE, U.; BEYSCHLAG, W. (eds.), Progress in Botany. **Progress in Botany**, v. 76, p. 93-107.

POMMERENIG, B.; DIEHN, T. A.; BIENERT, G. P. Metalloido-porins: essentiality of Nodulin 26-like intrinsic proteins in metalloid transport. **Plant Science**, v. 238, p. 212–227, 2015.

QING, X.; ZHAO, X.; HU, C.; WANG, P.; ZHANG, Y.; ZHANG X¹, WANG P¹, SHI H¹, JIA, F.; QU, C. Selenium alleviates chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*) leaves. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 114, p. 179-189, 2015.

RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; GUILHERME, L. R. G.; CASTRO, E. M.; ÁVILA, F. W.; CARVALHO, G. S.; BASTOS, C. E. A.; OLIVEIRA, C. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 56, n. 12, p. 584–588, 2010.

RAMOS, S. J.; YUAN, Y.; FAQUIN, V.; GUILHERME, L. R. G.; LI, L. Evaluation of Genotypic Variation of Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) in Response to Selenium Treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 59, n. 8, p. 3657–3665, 2011.

RAYMAN, M. P. Selenium and human health. **The Lancet**, v.379, p.1256-1268, 2012.

RAYMAN, M. P.; THOMPSON, A. J.; BEKAERT, B.; CATTERICK, J.; GALASSINI, R.; HALL, E.; WARREN-PERRY M.; BECKETT, G. J. Randomized controlled trial of the effect of selenium supplementation on thyroid function in the elderly in the United Kingdom. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 87, n. 2, p. 370-8, 2008.

REIS, A. R.; MORAES, M.; RAMOS, S. J.; GUILHERME, L. R. G. Agronomic biofortification of upland rice with selenium to improve human health. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Muenchen, v. 27, p. 42-42, 2013.

REZENDE, P. M.; MARTINEZ, R. A. S.; PASSOS, A. M. A.; BALIZA, D. P.; CARVALHO, E. R.; ÁVILA, F. W. Doses e formas de aplicação de selênio na produtividade e outras características agrônômicas da soja. **Global science and Technology**, v.4, n.3, p. 83-91, 2011.

RIBEIRO, D. M.; SILVA JUNIOR, D. D.; CARDOSO, F. B.; MARTINS, A. O.; SILVA, W. A.; NASCIMENTO, V. L.; ARAUJO, W. L. Growth inhibition by selenium is associated with changes in primary metabolism and nutrient levels in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 39, n. 10, p. 2235–2246, 2016.

RIOS, J. J.; BLASCO, B.; LEYVA, R.; SANCHEZ-RODRIGUEZ, E.; RUBIOWILHELMI, M. M.; ROMERO, L.; RUIZ, J. M. Nutritional Balance Changes in Lettuce Plant Grown Under Different Doses and Forms of Selenium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, n. 9, p. 1344–1354, 2013.

ROMAN, M.; JITARU, P.; BARBANTE, C. Selenium biochemistry and its role for human health. **Metallomics**, v. 6, n. 1, p. 25-54, 2014.

SAFFARYAZDI A, LAHOUTI M, GANJEALI A. BAYAT H. Impact of Selenium Supplementation on Growth and Selenium Accumulation on Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Plants. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 4, n. 95-100, 2012.

SAIDI, I.; NAWEL, N.; DJEBALI, W. Role of selenium in preventing manganese toxicity in sunflower (*Helianthus annuus*) seedling. **South African Journal of Botany**, v. 94, 88–94, 2014.

SANTI, C.; TIDEI, C.; SCALERA, C.; PIRODDI, M.; GALLI, F. Selenium Containing Compounds from Poison to Drug Candidates: A Review on the GPx-like Activity. **Current Chemical Biology**, v. 7, n. 1, p. 25–36, 2013.

SCHIAVON, M.; BERTO, C.; MALAGOLI, M.; TRENTIN, A.; SAMBO, P.; DALL'ACQUA, S.; PILON-SMITS, E. A. H. Selenium biofortification in radish enhances nutritional quality via accumulation of methyl-selenocysteine and promotion of transcripts and metabolites related to glucosinolates, phenolics, and amino acids. **Frontier in Plants Science**, Melbourne, v. 7, p. 1-18, 2016.

SCHIAVON, M.; PILON, M.; MALAGOLI, M.; PILON-SMITS, E. A. Exploring the importance of sulfate transporters and ATP sulphurylases for selenium hyperaccumulation-a comparison of *Stanleya pinnata* and *Brassica juncea* (Brassicaceae). **Frontiers in Plant Science**, v.6, n.2, p.1-12, 2015.

SCHRAUZER, G. N. The nutritional significance, metabolism and toxicology of selenomethionine. **Advance Food Nutrition Research**, v.47, p.73-112, 2003.

SCHWARZ, K.; FOLTZ, C. M. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration. **Journal of the American Chemical Society**, v. 79, n. 12, p. 3292–3293, 1957.

SHINMACHI, F.; BUCHNER, P.; STROUD, J. L.; ZHAO, F-J.; McGRATH, S. P.; HAWKESFORD, M. J. Influence of sulfur deficiency on the expression of specific sulfate transporters and the distribution of sulfur, selenium, and molybdenum in wheat. **Plant Physiology**, v. 153, p.327–336, 2010.

SILVA JÚNIOR, A. A. 1987. **Repolho: fitologia, fitotecnia, tecnologia alimentar e mercadológica**. Florianópolis: EMOASC. 259p.

SILVA, A. P. Selénio. Interesse Fisiológico e Clínico. **Acta Médica Portuguesa**, v. 6, p. 347-360, 1993.

SONG, Z.; SHAO, H.; HUANG, H.; SHEN, Y.; WANG, L.; WU, F.; HAN, D.; SONG, J.; JIA, H. Overexpression of the phosphate transporter gene OsPT8 Improves the Pi and selenium contents in *Nicotiana tabacum*. **Environmental and Experimental Botany**, v.137, p.58-165, 2017.

SONG, Z.; SHAO, H.; HUANG, H.; SHEN, Y.; WANG, L.; WU, F.; HAN, D.; SONG, J.; JIA, H. Overexpression of the phosphate transporter gene OsPT8 Improves the Pi and selenium contents in *Nicotiana tabacum*. **Environmental and Experimental Botany**, v.137, p.58-165, 2017.

SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 86, n. 3, p. 373–389, 2005.

SPALLHOLZ, J. E. On the nature of selenium toxicity and carcinostatic activity. **Free Radical Biology & Medicine**, 1994 v. 1, p. 45-64, 1994.

STADTMAN, T. C. Selenium biochemistry. **Annual Review Biochemistry**, v. 59, p. 111–127, 1990.

TAPIERO, H.; TOWNSEND, D. M.; TEW, K. D. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 57, n. 3-4, p. 134-44, 2003.

TAYLOR, D.; ARKIN, G.F. Root zone modification fundamentals and alternatives. In: TAYLOR, H.M.; ARKIN, G.F. (Eds.). **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph : ASAE, 1981. p.3-16.

TEGEDER, M. Transporters for amino acids in plant cells: some functions and many unknowns. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 15, p. 315–321, 2012.

TERRY, N.; ZAYED, A. M.; DE SOUZA, M. P.; TARUN, A. S. SELENIUM IN HIGHER PLANTS. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 51, n. 1, p. 401–432, 2000.

TEZOTTO, T.; FAVARIN, J. L.; PAULA NETO, A.; GRATÃO, P. L.; AZEVEDO, R. A.; MAZZAFERA, P. Simple procedure for nutrient analysis of coffee plant with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry (EDXRF). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 4, p. 263–267, 2013.

TIVELLI, S. W.; PURQUERIO, L. F. V. Repolho (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.). Associação Brasileira de Horticultura, 2015. Disponível em: <<http://www.abhorticultura.com.br/news/Default.asp?id=4198>>. Acesso em: 03 de fevereiro 2018.

TIVELLI, S. W.; PURQUERIO, L. F. V. Repolho. 2005. Disponível em:<<http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Repolho/Repolho.htm>>. Acesso em: 23 abril. 2018.

TIWARI, K.N.; SINGH, A.; MAL, P. K. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) under mulch and non-mulch conditions. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 19–28, 2003.

VALDIGLESIAS, V.; MÉNDEZ, J.; PÁSARO, E.; CEMELI, E.; ANDERSON, D.; LAFFON, B. Assessment of okadaic acid effects on cytotoxicity, DNA damage and DNA repair in human cells. **Mutation Research**, v. 689, p. 74-79, 2010.

VALENTINUZZI F., MASON M., SCAMPICCHIO M., ANDREOTTI C., CESCO S., MIMMO T. Enhancement of the bioactive compound content in strawberry fruits grown under iron and phosphorus deficiency. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n.10, p. 2088–2094, 2015.

VINCETI, M.; MANDRIOLI, J.; BORELLA, P.; MICHALKE, B.; TSATSAKIS, A.; FINKELSTEIN, Y. Selenium neurotoxicity in humans: Bridging laboratory and epidemiologic studies. **Toxicology Letters**, v. 230, n. 2, p. 295–303, 2014.

WACHOWICZ, B.; ZBIKOWSKA, H. M.; NOWAK, P. Selenium compounds in the environment; their effect on human health. **Cellular & Molecular Biology Letters**, v. 6., n. 2, p. 375-381, 2001.

WHITE, P. J.; BOWEN, H. C.; PARMAGURU, P.; FRITZ, M.; SPRACKLEN, W. P.; SPIBY, R. E.; MEACHAM, M. C.; MEAD, A.; HARRIMAN, M.; TRUEMAN, L. J.; SMITH, B. M.; THOMAS, B.; BROADLEY, M. R. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 404, p. 1927–1937, 2004.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R.; BOWEN, H. C.; JOHNSON, S. E. Selenium and its relationship with sulfur. In: HAWKESFORD, M. J.; KOK, L. J., editors. , eds. Sulfur in plants – an ecological perspective. **Dordrecht: Springer**, p. 225–252, 2007.

WHO. 1996. **Selenium**. In: Trace elements in human nutrition and health. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1996.

WINKEL, L.H., B. VRIENS, G.D. JONES, L.S. SCHNEIDER, E. PILON-SMITS, G.S. BAÑUELOS. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: A critical review. **Nutrients**, v.7, p. 4199-4239, 2015.

World Health Organization. The World health report : 1996 : fighting disease, fostering development / report of the Director-General. Geneva : World Health Organization, 1996.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental health criteria for selenium. Geneva, 1987. Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc58.htm>>. Acesso em: 5 de janeiro 2018.

WU, Z.; BAÑUELOS, G. S.; LIN, Z-Q.; LIU, Y.; YUAN, L.; YIN, X.; LI, M. Biofortification and phytoremediation of selenium in China. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. 136, p. 1-8, 2015.

YANG, J.; WANG, T.; WU, C.; LIU, C. Selenium level surveillance for the year 2007 of Keshan disease in endemic areas and analysis on surveillance results between 2003 and 2007. **Biology Trace Element Research**, v.138, p. 53–59, 2010.

ZAYED, A. M.; TERRY, N. Selenium volatilization in broccoli as influenced by sulfate supply. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 140, n. 646-652, 1992.

ZEMKOVÁ, L.; TOMÁŠ, J.; LOŠÁK, T.; JŮZL, M.; ELZNER, P. The effect of selenium application to the soil on the sulphur and phosphorus content in potatoes. **Acta Universitatis Agriculture et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, Zemědělská, v. 56, p. 243-250, 2008.

ZHANG, L.; ACKLEY, A. R.; PILON-SMITS, E. A. H. Variation in selenium tolerance and accumulation among 19 *Arabidopsis thaliana* accessions. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 164, p. 327-336, 2007.

ZHANG, M.; TANG, S.; HUANG, X.; ZHANG, F.; PANG, Y.; HUANG, Q.; YI, Q. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental and Experimental Botany**, Elmosford, v. 107, p. 39–45, 2014.

ZHANG, Y. L.; PAN, G. X.; CHEN, J.; HU, Q. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 253, p. 437-443, 2000.

ZHANG, Y.L.; PAN, G.X.; CHEN, J.; HU, Q. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v.253, p.437-443, 2003.

ZHAO, X. Q.; MITANI, N.; YAMAJI, N.; SHEN, R. F.; MA, J. F. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice. **Plant Physiology**, v. 153, p. 1871–1877, 2010.

ZHU, L.; WANG, P.; ZHANG, W.; HUI, F.; CHEN, X. Effects of selenium application on nutrient uptake and nutritional quality of *Codonopsis lanceolata*. **Scientia Horticulturae**, v. 225 p. 574–580, 2017.

ZHU, Y. G.; PILON-SMITS, E. A. H.; ZHAO, F. J.; WILLIAMS, P. N.; MEHARG, A. A. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. **Trends in Plant Science**, v.14, p.436-442, 2009.