

Elementos terras raras nas características anatômicas, nutricionais e fotossintéticas de *Pistia stratiotes*

Rare earth elements in the anatomical, nutritional and photosynthetic characteristics of *Pistia stratiotes*

Ana Carolina Oliveira Duarte¹  | Cynthia de Oliveira¹  | Evaristo Mauro de Castro¹  | Sílvio Junio Ramos^{II} 

¹Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais, Brasil

^{II}Instituto Tecnológico Vale. Belém, Pará, Brasil

Resumo: Elementos terras raras (ETR) são utilizados pela indústria tecnológica e compõem fertilizantes fosfatados, cujas exploração e utilização em grande escala podem resultar em aumento de contaminação destes elementos no ambiente. Sabe-se que *Pistia stratiotes* L. é uma macrófita eficiente na acumulação de poluentes. O objetivo do presente artigo foi avaliar o efeito das concentrações de ETR (isolados e mistura) sobre características morfoanatômicas, nutricionais, trocas gasosas e pigmentos fotossintetizantes de *Pistia stratiotes*. Foram avaliados as trocas gasosas (equipamento analisador de fotossíntese - IRGA), o teor de clorofila (equipamento medidor de clorofila - SPAD), a anatomia de raízes e folhas, o teor de nutrientes e a massa seca, conforme metodologia descrita. Houve redução do crescimento das plantas no sistema radicular nos tratamentos com mistura de ETR e lantânio (La). Notou-se aumento na transpiração para a manutenção do fluxo, compensando a perda de condutividade e permitindo a chegada de nutrientes até a parte aérea. A coifa alongou-se nos tratamentos de La para proteção da região meristemática. A absorção de alguns nutrientes reduziu, em virtude da redução do sistema radicular. As barreiras foram espessadas nos tratamentos com cério (Ce). Essas modificações ocorreram evitando que os ETR fossem absorvidos, transportados e causassem algum efeito negativo no vegetal.

Palavras-chave: Alface d'água. Anatomia. Clorofila. ETR. Massa seca.

Abstract: Rare earth elements (ETR) are used by the technological industry and comprise phosphate fertilizers and their exploration and use on a large scale may result in an increase in the contamination of ETRs in the environment. *Pistia stratiotes* L. is known to be an efficient macrophyte in pollutant accumulation. The objective of the present work was to evaluate the effect of ETR concentrations (isolates and mixture) on morphoanatomical and nutritional characteristics, gas exchange and photosynthetic pigments of *Pistia stratiotes*. Gas exchange (photosynthesis analyzer - IRGA), chlorophyll content (chlorophyll meter - SPAD), and the anatomy of roots and leaves, nutrient content, and dry mass were evaluated. There was a reduction in plant growth and the root systems in treatments with a mixture of ETR and lanthanum (La). There is an increase in transpiration to maintain the flow, compensating for the loss of conductivity and allowing nutrients to reach the aerial part. The hoods are extended in La treatments to protect the meristematic region. The absorption of some nutrients are reduced due to the reduction of the root system. The barriers were thickened in the treatments with cerium (Ce). These changes occurred preventing the ETR from being absorbed and transported, causing negative effects on the plant.

Keywords: Water lettuce. Anatomy. Chlorophyll. ETR. Dry mass.

Duarte, A. C. O., Oliveira, C., Castro, E. M., & Ramos, S. J. (2022). Elementos terras raras nas características anatômicas, nutricionais e fotossintéticas de *Pistia stratiotes*. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, 17(1), 219-236. <http://doi.org/10.46357/bcnaturais.v17i1.334>

Autora para correspondência: Ana Carolina Oliveira Duarte. Rua Padre Salvador Godoi, 175 – Souza e Silva. Formiga, MG, Brasil. CEP 35577-250 (acoliveiraduarte@gmail.com).

Recebido em 24/07/2020

Aprovado em 11/06/2021

Responsabilidade editorial: Ana Carla Feio dos Santos



INTRODUÇÃO

Os elementos terras raras (ETR) formam um grupo de elementos com números atômicos sucessivos de 57 (lantânio) até 71 (lutécio), juntamente com ítrio (39) e escândio (21), os quais são reconhecidos pela *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*, devido ao semelhante comportamento químico, toxicológico e por serem frequentemente encontrados nos mesmos minerais de origem (Ramos et al., 2016). Esses elementos tendem a existir juntos naturalmente, em vários tipos de minerais, apresentando propriedades químicas e físicas semelhantes, o que explica seus comportamentos parecidos no ambiente. O nome terras raras pode resultar em interpretações equivocadas, visto que não são escassos quando se leva em consideração sua abundância relativa na crosta terrestre (Tyler, 2004). Seu uso é aplicado em diferentes áreas das ciências da terra, especialmente hidrologia, geoquímica e geologia (Protano & Riccobo, 2002; Wang et al., 2014). Em virtude destas propriedades, os ETR têm sido amplamente utilizados (Redling, 2006), o que tem proporcionado o excesso de acumulação destes no meio ambiente (Kulaksiz & Bau, 2011; Wiseman et al., 2015).

Nos últimos anos, fertilizantes à base de ETR foram amplamente estudados e aplicados na agricultura e na pecuária, para aumento de rendimento e melhoria de qualidade (Carpenter et al., 2015). No entanto, a validade e o possível mecanismo por trás do aumento do rendimento vegetal ainda são desconhecidos, uma vez que os ETR são considerados elementos não essenciais para plantas e outros organismos, fazendo com que seus efeitos sejam atribuídos a uma mudança no balanço de nutrientes das plantas (Tyler, 2004).

Além disso, atividades de exploração em larga escala dos recursos naturais têm resultado em aumento substancial dos níveis de contaminação no solo e na água em áreas de mineração (Mao et al., 2011). O elevado uso de fertilizantes e de produtos de alta tecnologia vem aumentando os níveis de ETR no ambiente. Principalmente na China, a elevada concentração de ETR já foi observada em solos

adjacentes a zonas agrícolas com uso intensivo de fertilizantes enriquecidos. Huang et al. (2007) estimaram que a taxa de extração foi de 119.000 toneladas em 2005 no referido país. Sendo assim, estima-se que os elementos terras raras se tornem poluentes emergentes (Mancheri, 2015).

A presença de ETR em excesso em solos pode resultar em sérias consequências para os ecossistemas, para a produtividade agrícola e na saúde humana, já que os efeitos de acumulação em organismos permanecem fragmentados e inconsistentes. Em comparação com a extensa pesquisa em outros metais (Cu, Zn, Ni, Cd e Pb), apenas poucas publicações relatam ecotoxicidade de ETR (Herrmann et al., 2016). González et al. (2015) identificaram a toxicidade de Ce, Gd e Lu para uma variedade de espécies aquáticas. Li et al. (2018) mostraram que La era tóxico para vertebrados. A maioria dos dados de toxicidade disponíveis foi obtida pela exposição das espécies de teste a apenas um metal, fazendo com que estudos sobre a toxicidade conjunta de ETR sejam relevantes, pela coexistência dos mesmos (Romero-Freire et al., 2018). O Brasil apresenta depósitos com grande potencial de produção, com ocorrências de vários minerais portadores de ETR, como bastnaesita, monazita e apatita, sendo esta última explorada comercialmente para a produção de fertilizantes fosfatados. Isso leva a uma preocupação crescente com o impacto que o acúmulo destes elementos pode causar no ambiente. Tal fato apresenta consequências ambientais significativas, uma vez que ETR lixiviados podem afetar ecossistemas aquáticos (Protano & Riccobono, 2002). Devido às atividades de mineração, em minérios portadores secundários de ETR, grandes quantidades de ETR podem ser liberadas em corpos d'água, por duas maneiras: descarga direta de águas residuais industriais que contêm ETR ou pela lixiviação em solos que são enriquecidos com esses elementos. Indústrias de fertilizantes operando ao longo de margens de rios produzem grande volume de fosfogesso, um subproduto industrial formado durante a produção de fertilizantes fosfatados e usados regularmente na agricultura. Durante o processo industrial, o filtrado de fosfogesso é bombeado para lagoas próximas, onde permanece por um

período suficiente para permitir sua deposição. Grandes volumes de fosfogesso são geralmente armazenados em pilhas expostas, que estão sujeitas a lixiviação pela chuva, erosão e transporte pelo vento ou água. O crescimento na produção de fertilizantes fosfatados requer uma investigação aprofundada sobre os teores de ETR no solo e na água nos locais, ou próximo a eles, onde os fertilizantes são fabricados e onde o fosfogesso é estocado (Ramos et al., 2016).

A fitorremediação, um método baseado na capacidade de algumas plantas de remover o metal de águas poluídas (Mishra & Tripathi, 2008), é utilizada para mitigar efeitos de poluentes em solo e corpos d'água, sendo um processo indicado para a diminuição dos efeitos danosos que podem ser causados pelos ETR como poluentes emergentes em ecossistemas. Assim, esse processo no qual se utilizam plantas hiperacumuladoras, devido ao seu potencial de conter uma quantidade enorme de metal pesado em seus órgãos, é indicado para o controle do excesso de ETR em ambientes terrestres e aquáticos.

No entanto, os hiperacumuladores em geral se desenvolvem lentamente e possuem baixa biomassa, em razão de sua exposição a elementos tóxicos em níveis elevados (He et al., 2015). A captação de ETR pelas plantas também depende da mobilidade e da biodisponibilidade no solo (Loell et al., 2011). Além disso, de maneira geral, poucos estudos foram realizados para avaliar a capacidade de espécies vegetais em remediar os efeitos das concentrações de ETR em ambientes aquáticos. Tais fatos destacam a necessidade de uma melhor compreensão da distribuição e do comportamento biogeoquímico de ETR em rios, lagos e águas subterrâneas, em particular no que diz respeito aos seus efeitos no crescimento vegetal. Alguns estudos mostraram que o teor de clorofila, a taxa fotossintética e a produção de biomassa podem ser aumentados por ETR (D'Aquino et al., 2009), no entanto, alguns resultados ainda são contraditórios.

A espécie *Pistia stratiotes*, conhecida popularmente como alface-d'água, uma macrófita flutuante pertencente à família Araceae, nativa da região sul do continente

americano e mundialmente distribuída, também considerada ornamental, apresenta potencial para remediar ambientes aquáticos com excesso de ETR. Esse grupo de plantas macrófitas que representam uma importante comunidade em ecossistemas aquáticos tem sido amplamente utilizado, com sucesso, na recuperação de rios e lagos poluídos, pois suas raízes formam uma densa rede, capaz de absorver elementos na água, além de ser utilizado como abrigo e alimento para a fauna. *P. stratiotes* tem sido utilizada para a remoção de mercúrio de efluentes de mineração, por acumular o metal em suas raízes, a fitorremediação de metais pesados, com eficácia no tratamento de efluentes de aquicultura. Sendo assim, poderia também acumular ETR nestes ambientes, principalmente em rios e lagos próximos a pilhas de fosfogesso, onde há concentrações mais elevadas de ETR.

Diante do exposto, o objetivo do presente artigo foi avaliar o efeito das concentrações de ETR (isolados e mistura) sobre características morfoanatômicas, nutricionais, trocas gasosas e pigmentos fotossintetizantes de *Pistia stratiotes*, contribuindo com os estudos de fitorremediação.

MATERIAL E MÉTODOS

OBTENÇÃO DO MATERIAL VEGETAL E IMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS

O experimento foi conduzido na casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e as avaliações foram realizadas no Laboratório de Anatomia Vegetal e no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas desta universidade. As plantas de *Pistia stratiotes* foram coletadas de populações em açudes naturais no sul de Minas; foram lavadas em água corrente e desinfetadas com hipoclorito de sódio. Posteriormente, essas plantas foram propagadas em casa de vegetação, onde permaneceram em bandejas plásticas contendo 20 litros de solução nutritiva (Hoagland & Arnon, 1950), a 20% de força iônica. As plantas com tamanho médio de 5 cm de diâmetro foram utilizadas para a instalação do experimento, as quais

foram colocadas em bandejas com capacidade para 20 litros, sendo utilizada para cada tratamento solução nutritiva (Hoagland & Arnon, 1950), contendo separadamente as diferentes concentrações de ETR.

Os ETR utilizados foram escolhidos de maneira que os tratamentos fossem parecidos com as condições naturais de distribuição dos elementos no solo: cério, lantânio, neodímio, gadolínio e samário. Os tratamentos utilizados foram: 0 (controle), 10 μM de Ce, 40 μM de Ce; 10 μM de La, 40 μM de La; mistura de ETR contendo 10 μM de La e Ce + 3,5 μM de Sm e Gd + 5 μM de Nd (Mix 1); e mistura de ETR contendo 40 μM de Ce e La + 7 μM de Sm e Gd + 10 μM de Nd (Mix 2), todos na forma de nitrato. O tempo de exposição das plantas aos tratamentos foi de 45 dias, sendo que a solução nutritiva e os tratamentos foram trocados semanalmente.

ANÁLISES FOTOSSINTÉTICAS E ANATÔMICAS

Para avaliação fotossintética, foram verificadas a fotossíntese líquida (A), a transpiração (E) e a condutância estomática (gs), realizadas com auxílio do sistema portátil de fotossíntese LI-6400 (Li-Cor, Nebraska, EUA), equipado com câmara de 6 cm² e fonte artificial de luz (6400-02 B Red Blue, Li-Cor, Nebraska, EUA). A taxa de fluxo de fótons fotossinteticamente ativa utilizada foi de 1.000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As avaliações foram feitas entre 8h e 10h. A parcela experimental foi constituída de uma folha por planta e uma planta por repetição.

Juntamente com a análise fotossintética, foi realizada a medição indireta do teor de clorofila, com auxílio do medidor portátil de clorofila SPAD-502 (Konica Minolta, Tokyo, Japan), usando a média de 3 folhas de uma planta para cada repetição. As medições com IRGA (*Infrared Gas Analyser*) e SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) foram feitas aos 45 dias do experimento com *P. stratiotes*.

Para as avaliações anatômicas, o material foi coletado e fixado em F.A.A._{70%} (formaldeído, ácido acético e etanol 70% na proporção de 1:1:18), posteriormente armazenado em etanol 70% (Johansen, 1940). Para confecção do

laminário, as amostras de raiz e folha já fixadas foram submetidas à série de desidratação etanólica (70%, 90% e 100%), permanecendo por duas horas em cada uma das soluções. Após essa etapa, as amostras foram infiltradas e incluídas em hidroxietil-metacrilato Leica®, seguindo as instruções propostas pelo fabricante. As secções transversais foram realizadas com auxílio de micrótomo semiautomático rotativo, com a espessura ajustada para 7 μm . Esse material foi corado com azul de toluidina 1% e as secções foram montadas em lâmina e lamínula com bálsamo do Canadá (O'Brien et al., 1964). As lâminas foram observadas em microscópio trinocular (CX31, Olympus Tokyo, Japan), com sistema de captura acoplado, sendo digitalizadas e analisadas em *software* de análise de imagem UTHSCSA-Imagetool.

O delineamento experimental para as avaliações anatômicas quantitativas foi inteiramente casualizado, com 4 repetições para cada tratamento, sendo confeccionada uma lâmina por repetição, fotografadas cinco secções por lâmina e mensurados quatro campos por imagem. As variáveis avaliadas para folha foram: espessura do parênquima paliçádico, proporção das câmaras do aerênquima, espessura do limbo e diâmetro dos elementos de vaso do metaxilema. Para a raiz, foram avaliados: espessura de epiderme, exoderme e córtex, área de aerênquima e diâmetro dos elementos de vaso do metaxilema.

ANÁLISE NUTRICIONAL

Para a avaliação das concentrações de macro e micronutrientes de maior ocorrência e interação com ETR (Zn, Mg, Fe, Ca, K e Mn), as folhas e raízes de 2 plantas de *P. stratiotes* foram lavadas em água corrente e secas em estufa, com circulação forçada de ar a 60 °C, durante 72 horas. A massa seca foi pesada e, em seguida, esse material foi triturado em moinho de facas, modelo Willey, e 500 mg de massa seca foram pesados em balança analítica, sendo o material adicionado em tubos de teflon, juntamente com cerca de 5 mL de ácido nítrico, previamente destilado. Em seguida, as amostras foram digeridas em forno de microondas de fabricação

modelo CEM Mars X-press, a cerca de 180 °C e à pressão de 65 psi, em uma rampa de aquecimento de 10 minutos, segundo método 3051A (USEPA, 1998). Após a digestão, os volumes foram completados com água bidestilada até 10 mL em um balão volumétrico. Os teores de macro e micronutrientes foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica com chama.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro Wilk, sendo aplicada transformação quando não houve distribuição normal. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, com 5% de significância. Todos esses procedimentos foram realizados com auxílio do *software* Sisvar 5.0 (Ferreira, 2011).

RESULTADOS

ETR são considerados elementos não essenciais para plantas e outros organismos e, portanto, esses fenômenos são frequentemente atribuídos a uma mudança no balanço de nutrientes das plantas. Esses resultados mostram que os ETR reduziram alguns dos teores dos micronutrientes. A influência das concentrações de ETR sobre os teores de micronutrientes e macronutrientes é apresentada na Tabela 1. O teor de Zn reduziu nos tratamentos com La isoladamente; os teores de Cu e Fe foram menores em todos os tratamentos, sendo que a maior parte do que foi absorvido ficou retido nas raízes. Para os macronutrientes avaliados, os teores não apresentaram diferença significativa, exceto para Mg, onde houve retenção da maior parte absorvida nas raízes, comparado ao controle.

A produção de massa seca das raízes e da parte aérea foi influenciada significativamente pelas concentrações de ETR na solução nutritiva, como premissa das hiperacumuladoras. Observou-se que as concentrações de La e os tratamentos com mistura de ETR aplicados influenciaram negativamente o crescimento e a razão entre a raiz e a parte aérea de *Pistia stratiotes* (Tabela 2 e Figura 1). Além da redução

no crescimento, o La também interferiu na formação de novas folhas e causou clorose (Figura 1C), visto que o teor relativo de clorofila reduziu a concentração de Ce (0,1 mM) e La (0,4 mM), enquanto manteve-se semelhante no controle dos demais tratamentos. A aplicação de ETR em mistura não alterou o teor de clorofila. Verificou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos para taxa fotossintética e condutância estomática, apenas a transpiração apresentou redução significativa, em função dos tratamentos aplicados (Tabela 2).

Pistia stratiotes possui epiderme foliar unisseriada, estômatos nas duas faces da epiderme (folha anfiestomática), muitos tricomas tectores, aerênquima preenchendo grande parte do mesófilo, parênquimas paliçádico e esponjoso, assim como mostra a Figura 2. Tais resultados estão de acordo com o apresentado por Silva et al. (2013). As avaliações dos tecidos foliares mostraram modificações significativas com a adição de ETR na solução nutritiva. Conforme a Tabela 2, Ce promoveu o espessamento do parênquima paliçádico, que, conseqüentemente, aumentou a espessura do limbo. A mistura de ETR aumentou significativamente a porcentagem de câmaras da folha. Os diâmetros do metaxilema foram maiores apenas nos tratamentos com a maior concentração de La (0,04 mM de La) e Mix 2; as demais médias não diferiram significativamente do controle (Tabela 2).

As raízes de *P. stratiotes* são compostas por epiderme unisseriada, córtex, o qual pode ser dividido em externo (exoderme), mediano (aerênquimas) e interno (endoderme), e cilindro vascular, como mostra a Figura 3 e é descrito por Akapo et al. (2011). A anatomia radicular foi modificada significativamente em função da presença de ETR; o Ce provocou o espessamento de tecidos radiculares, ocorrendo aumentos importantes na epiderme, exoderme e endoderme. A espessura do córtex e os diâmetros de metaxilema nos tratamentos com 0,04 mM de Ce e nas misturas de ETR foram maiores comparados ao controle. A proporção de aerênquima foi maior também em Mix 1 e 2 (Tabela 2).

Tabela 1. Teor de micronutrientes e macronutrientes na raiz e parte aérea em *Pistia stratiotes*. Legendas: Zn T = teor total de Zn; Zn R = porcentagem de Zn na raiz; Zn PA = porcentagem de Zn na parte aérea; Fe T = teor total de Fe; Fe PA = porcentagem de Fe na raiz; Cu T = teor total de Cu; Cu R = porcentagem de Cu na raiz; Cu PA = porcentagem de Cu na parte aérea; Mn T = teor total de Mn; Mn R = porcentagem de Mn na raiz; Mn PA = porcentagem de Mn na parte aérea; Mg T = teor total de Mg; Mg R = porcentagem de Mg na raiz; Mg PA = porcentagem de Mg na parte aérea; Ca T = teor total de Ca; Ca R = porcentagem de Ca na raiz; Ca PA = porcentagem de Ca na parte aérea; K T = teor total de K; K R = porcentagem de K na raiz; K PA = porcentagem de K na parte aérea. (Continua)

Table 1. Micronutrient and macronutrient content in root and shoot in *Pistia stratiotes*. Legends: Zn T = total Zn content; Zn R = of Zn at the root; Zn PA = Zn in the shoot; Fe T = total Fe content; Fe PA = Fe in the root; Cu T = total Cu content; Cu R = of Cu in the root; Cu PA = Cu in the shoot; Mn T = total Mn content; Mn R = of Mn in the root; Mn PA = Mn in the shoot; Mg T = total Mg content; Mg R = from Mg in the root; Mg PA = Mg in the shoot; Ca T = total Ca content; Ca R = of Ca in the root; Ca PA = of Ca in the shoot; K T = total K content; K R = of K at the root; K PA = of K in the shoot. (Continue)

[ETR] (mM)	Zn (mg/L)	Zn R (%)	Zn PA (%)	Mg (mg/L)	Mg R (%)	Mg PA (%)
0- controle	68,73 ± 5,69 a	59,69 ± 1,42 a	40,31 ± 1,42 a	2.1895,89 ± 2.139,55 a	15,76 ± 1,50 b	84,24 ± 1,50 a
0,01 mM Ce	66,41 ± 4,86 a	58,07 ± 3,81a	41,92 ± 3,81 a	22.152,11 ± 2.192,00 a	24,87 ± 4,36 a	75,13 ± 4,36 b
0,04 mM Ce	62,02 ± 4,11 a	60,99 ± 2,81a	39,01 ± 2,81 a	21.203,84 ± 1.933,48 a	28,59 ± 1,38 a	71,41 ± 1,38 b
0,01 mM La	48,93 ± 4,44 b	62,62 ± 0,71a	37,37 ± 0,71 a	21.399,58 ± 1.241,68 a	28,68 ± 1,35 a	71,32 ± 1,35 b
0,04 mM La	53,01 ± 0,55 b	67,15 ± 2,90 a	32,84 ± 2,90 a	24.516,52 ± 1.020,83 a	23,07 ± 1,10 a	76,92 ± 1,10 b
Mix 1	66,24 ± 0,55 a	57,49 ± 0,07 a	42,50 ± 0,07 a	24.068,52 ± 625,45 a	25,76 ± 0,64 a	74,24 ± 0,64 b
Mix 2	64,78 ± 1,48 a	63,91 ± 3,86 a	36,08 ± 3,86 a	19.987,40 ± 631,82 a	25,12 ± 3,01 a	74,88 ± 3,01 b
CV (%)	9,34	4,43	7,05	7,79	10,51	3,16
[ETR] (mM)	Fe (mg/L)	Fe R (%)	Fe PA (%)	Ca (mg/L)	Ca R (%)	Ca PA (%)
0- controle	3.786,01 ± 280,50 a	92,92 ± 0,72 a	7,08 ± 0,72 a	16577,26 ± 812,03 a	45,20 ± 1,94 a	54,80 ± 1,94 a
0,01 mM Ce	3.579,74 ± 228,18 a	96,25 ± 0,25 a	3,75 ± 0,25 a	15999,39 ± 915,40 a	45,15 ± 4,84 a	54,85 ± 4,84 a
0,04 mM Ce	2.092,79 ± 231,57 b	94,22 ± 1,81 a	5,78 ± 1,81 a	15359,62 ± 359,92 a	45,50 ± 4,18 a	54,49 ± 4,18 a
0,01 mM La	2.190,74 ± 279,80 b	96,34 ± 1,44 a	3,65 ± 1,44 a	18027,65 ± 1276,25 a	43,89 ± 2,94 a	56,10 ± 2,94 a
0,04 mM La	2.259,29 ± 375,09 b	93,02 ± 1,47 a	6,97 ± 1,47 a	16783,67 ± 1426,27 a	48,25 ± 3,19 a	51,75 ± 3,19 a
Mix 1	1.188,75 ± 124,44 c	88,36 ± 1,19 a	11,64 ± 1,19 a	13589,77 ± 242,80 a	49,28 ± 0,06 a	50,72 ± 0,06 a
Mix 2	1.226,80 ± 97,98 c	90,44 ± 0,40 a	9,55 ± 0,40 a	12160,49 ± 229,89 a	48,99 ± 3,36 a	51,00 ± 3,36 a
CV (%)	9,62	6,38	15,78	5,38	7,46	6,45
[ETR] (mM)	Cu (mg/L)	Cu R (%)	Cu PA (%)	K (mg/L)	K R (%)	K PA (%)
0- controle	22,33 ± 1,57 a	76,17 ± 2,24 b	23,83 ± 2,24 a	47.459,39 ± 1.492,52 a	65,77 ± 1,66 a	34,22 ± 1,66 a
0,01 mM Ce	19,04 ± 2,55 b	88,87 ± 2,37 a	11,13 ± 2,37 b	24.049,14 ± 1.944,16 a	51,44 ± 1,68 a	48,56 ± 1,68 a
0,04 mM Ce	15,31 ± 1,10 c	82,40 ± 0,71 a	17,60 ± 0,71 b	22.937,42 ± 1.224,18 a	48,80 ± 1,79 a	51,70 ± 1,79 a
0,01 mM La	18,78 ± 0,30 b	84,98 ± 0,54 a	15,01 ± 0,54 b	25.108,55 ± 1.185,45 a	63,24 ± 1,97 a	36,75 ± 1,97 a
0,04 mM La	13,77 ± 0,99 c	83,73 ± 1,86 a	16,26 ± 1,86 b	11.943,94 ± 283,11 a	43,20 ± 1,41 a	76,80 ± 1,41 a
Mix 1	15,32 ± 1,25 c	83,83 ± 2,46 a	16,16 ± 2,46 b	23.106,64 ± 941,32 a	45,18 ± 0,86 a	54,81 ± 0,86 a
Mix 2	11,70 ± 0,84 c	81,24 ± 0,99 a	18,76 ± 0,99 b	21.024,53 ± 198,25 a	48,80 ± 2,03 a	51,19 ± 2,03 a
CV (%)	8,91	2,2	10,72	9,76	9,0	9,33
[ETR] (mM)	Mn (mg/L)	Mn R (%)	Mn PA (%)			
0- controle	306,05 ± 7,27 a	71,40 ± 1,04 a	28,56 ± 1,04 a			
0,01 mM Ce	340,62 ± 11,48 a	80,93 ± 1,29 a	19,07 ± 1,29 a			
0,04 mM Ce	304,29 ± 5,69 a	77,60 ± 2,06 a	22,39 ± 2,06 a			
0,01 mM La	354,11 ± 17,49 a	80,32 ± 0,04 a	19,68 ± 0,04 a			

Tabela 1 | Table 1.

(Conclusão) | (Conclusion)

[ETR] (mM)	Mn (mg/L)	Mn R (%)	Mn PA (%)
0,04 mM La	335,70 ± 26,19 a	86,14 ± 0,17 a	13,86 ± 0,17 a
Mix 1	387,21 ± 8,06 a	86,41 ± 1,22 a	13,58 ± 1,22 a
Mix 2	344,04 ± 16,47 a	80,12 ± 1,40 a	19,88 ± 1,40 a
CV (%)	7,79	10,52	3,65

Tabela 2. Massa seca de plantas de *Pistia stratiotes* nas diferentes concentrações de ETR em solução nutritiva. Legendas: R = raiz; PA = parte aérea; T = massa seca total da planta; R/PA = razão raiz x parte aérea; SPAD = teor relativo de clorofila; A = taxa fotossintética; E = taxa transpiratória; gs = condutância estomática. Espessura dos tecidos foliares: ELI = espessura do limbo; PAP = parênquima paliçádico; DME = diâmetro do metaxilema; PAER = proporção de câmaras de aerênquima. Espessura dos tecidos radiculares: EPI = epiderme; EXO = exoderme; COR = córtex; END = endoderme; DME = diâmetro do metaxilema; PAE = proporção de aerênquima.

Table 2. Dryness of *Pistia stratiotes* plants in different combinations of REE in solution. Captions: R = root; PA = aerial part; T = total plant dry mass; R/PA = root x shoot ratio; SPAD = relative chlorophyll content; A = photosynthetic rate; E = transpiration rate; gs = stomatal conductance. Thickness of leaf tissues: ELI = limb thickness; PAP = palisade parenchyma; DME = metaxylem diameter; PAER = proportion of aerenchyma chambers. Root tissue thickness: EPI = epidermis; EXO = exoderm; COR = cortex; END = endoderm; DME = metaxylem diameter; PAE = proportion of aerenchyma.

[ETR] (mM)	R (g)	PA (g)	T (g)	R/PA (%)	SPAD
0- controle	0,38 ± 0,07 a	2,09 ± 0,08 a	2,47 ± 0,11 a	15,50 ± 2,43 a	40,92 ± 1,94 a
0,01 mM Ce	0,43 ± 0,09 a	2,10 ± 0,13 a	2,56 ± 0,20 a	16,66 ± 2,41 a	37,22 ± 2,40 b
0,04 mM Ce	0,37 ± 0,09 a	2,12 ± 0,21 a	2,47 ± 0,23 a	14,85 ± 3,50 a	40,52 ± 2,22 a
0,01 mM La	0,26 ± 0,08 b	2,08 ± 0,34 a	2,32 ± 0,40 a	9,67 ± 2,41 b	40,65 ± 1,83 a
0,04 mM La	0,30 ± 0,04 b	1,76 ± 0,23 b	2,06 ± 0,26 b	11,74 ± 1,17 b	35,87 ± 3,39 b
Mix 1	0,29 ± 0,06 b	1,69 ± 0,24 b	1,98 ± 0,30 b	14,67 ± 1,69 b	39,17 ± 1,84 a
Mix 2	0,26 ± 0,04 b	1,86 ± 0,30 b	2,12 ± 0,31 b	12,45 ± 2,06 b	42,65 ± 1,58 a
CV (%)	22,76	11,87	11,91	16,59	5,68
[ETR] (mM)	ELI (μm)	PAP (μm)	DME (μm)	PAER (%)	PAE (%)
0- controle	302,60 ± 35,71 b	81,23 ± 15,74 b	17,54 ± 3,60 b	30,92 ± 5,02c	33,56 ± 2,36 c
0,01 mM Ce	316,91 ± 32,37 a	89,81 ± 18,10 a	17,71 ± 2,13 b	33,15 ± 4,90b	33,21 ± 3,37 c
0,04 mM Ce	313,98 ± 20,67 a	96,67 ± 14,86 a	17,63 ± 3,13 b	33,73 ± 4,42b	33,03 ± 5,38 b
0,01 mM La	300,45 ± 24,81 b	81,88 ± 14,01 b	15,97 ± 2,58 b	34,94 ± 4,88b	34,47 ± 5,29 c
0,04 mM La	288,99 ± 23,99 b	81,67 ± 15,45 b	19,23 ± 2,15 a	30,19 ± 6,47c	32,41 ± 2,32 c
Mix 1	303,44 ± 29,11 b	76,11 ± 12,37 b	16,61 ± 2,79 b	36,76 ± 4,98a	36,44 ± 4,38 b
Mix 2	312,67 ± 15,84 b	76,62 ± 11,96 b	19,60 ± 2,15 a	39,60 ± 5,70a	46,10 ± 3,40 a
CV (%)	15,24	8,83	9,02	15,32	5,5
[ETR] (mM)	EPI (μm)	EXO (μm)	COR (μm)	END (μm)	DME (μm)
0- controle	7,90 ± 1,57 b	7,74 ± 1,74 b	247,78 ± 38,27 c	8,14 ± 1,61 a	23,85 ± 4,93 b
0.01 mM Ce	9,03 ± 1,20 a	8,85 ± 1,25 a	242,90 ± 26,68 c	8,59 ± 1,35 a	27,14 ± 3,61 a
0.04 mM Ce	9,16 ± 1,63 a	8,55 ± 1,61 a	299,63 ± 48,02 b	8,94 ± 1,81 a	32,05 ± 4,25 a
0.01 mM La	8,27 ± 2,49 b	7,11 ± 1,24 b	229,84 ± 46,65 c	6,88 ± 1,17 b	21,77 ± 5,95 b
0.04 mM La	7,08 ± 1,25 b	6,57 ± 1,45 b	243,31 ± 52,08 c	6,93 ± 1,22 b	23,30 ± 3,16 b
Mix 1	7,07 ± 1,55 b	6,55 ± 1,33 b	275,04 ± 39,53 b	6,20 ± 1,32 b	24,66 ± 4,45 b
Mix 2	7,93 ± 1,21 b	8,25 ± 1,79 a	335,14 ± 23,29 a	7,61 ± 1,83 b	30,74 ± 4,06 a
CV (%)	17,59	18,77	8,06	9,78	16,7



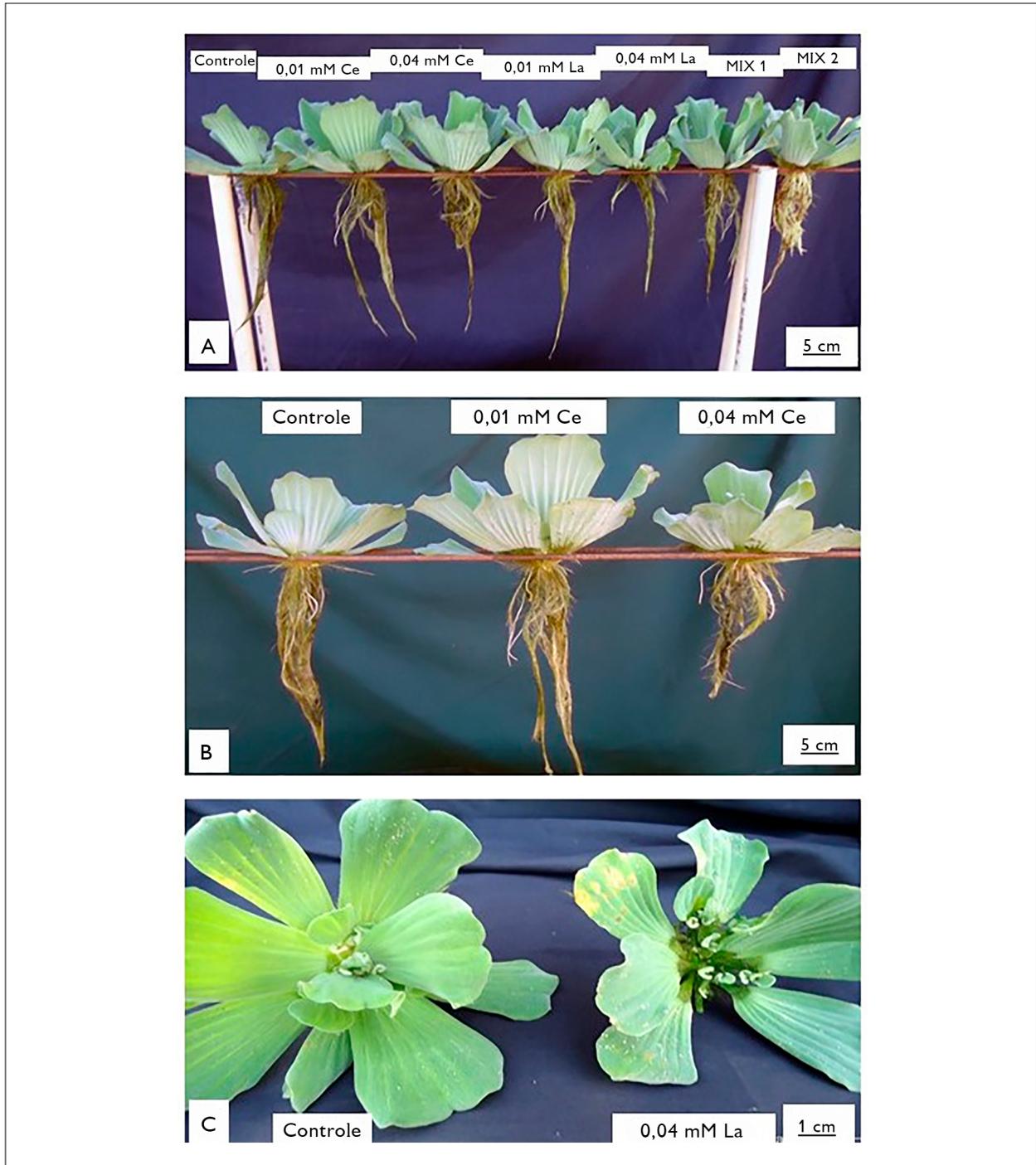


Figura 1. A) *Pistia stratiotes* aos 45 dias do tratamento com ETR; B) comparação entre o tratamento de controle e Ce; C) comparação entre tratamento de controle e La. Fotos: Ana Carolina Oliveira Duarte (2018).

Figure 1. *Pistia stratiotes* at 45 days of ETR treatment; B) comparison between the control and Ce treatment; C) comparison between control treatment and La. Photos: Ana Carolina Oliveira Duarte (2018).

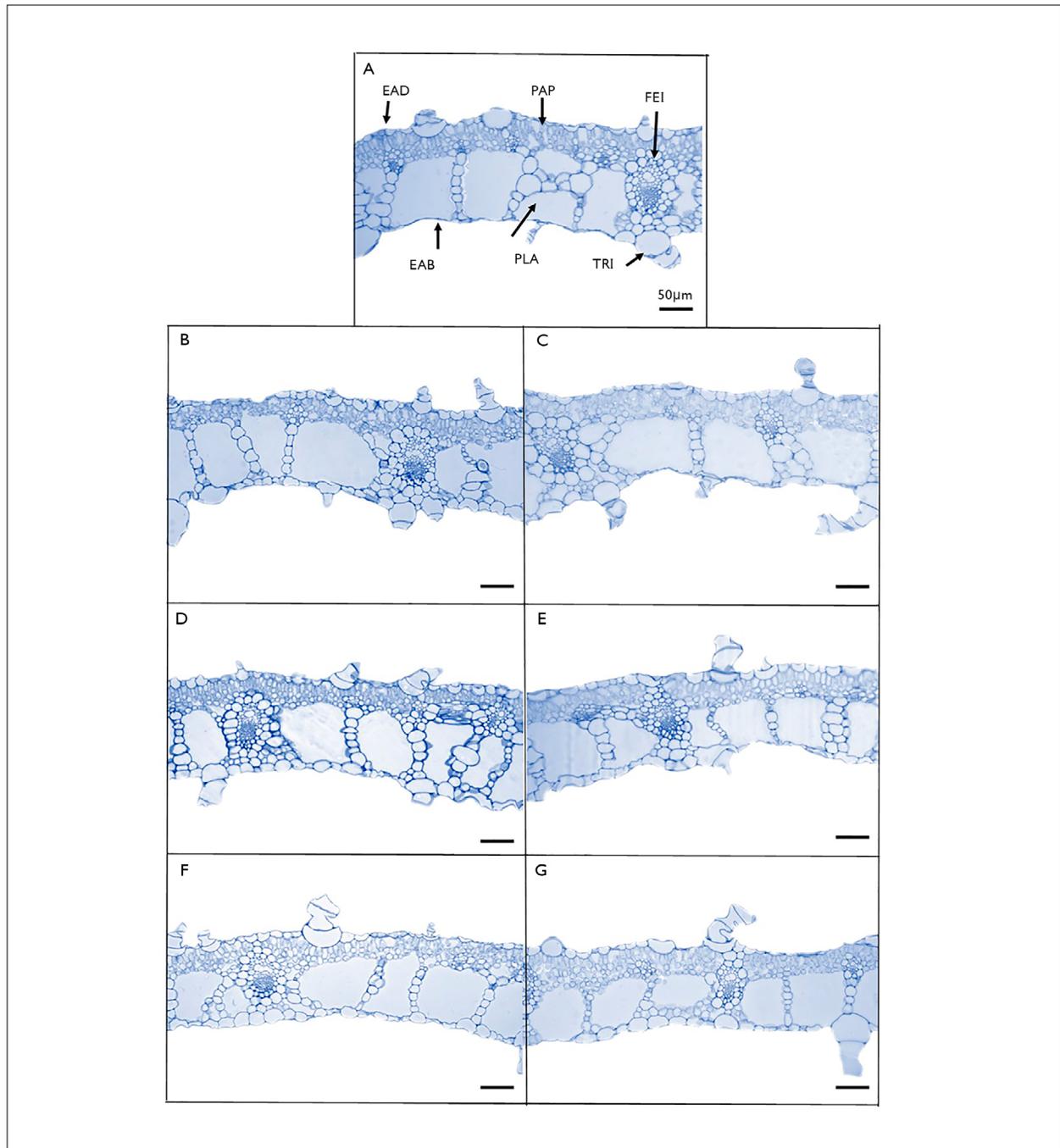


Figura 2. Secções transversais de folhas de *Pistia stratiotes* submetidas a diferentes concentrações de ETR: A) controle; B) 10 mM Ce; C) 40 mM Ce; D) 10 mM La; E) 40 mM La; F) Mix 1; G) Mix 2. Barras = 100 μm. Legendas: EAD = epiderme da face adaxial; EAB = epiderme da face abaxial; PAP = parênquima paliçádico; PLA = parênquima Lacunoso; FEI = feixe vascular; TRI = tricoma.

Figure 2. Cross sections of leaves of *Pistia stratiotes* subjected to different concentrations of REE: A) control; B) 10 mM Ce; C) 40 mM Ce; D) 10 mM La; E) 40 mM La; F) Mix 1; G) Mix 2. Bars = 100 μm. Legends: EAD = epidermis of the adaxial face; EAB = epidermis of the abaxial face; PAP = palisade parenchyma; PLA = Lacunous parenchyma; FEI = vascular bundle; TRI = trichome.

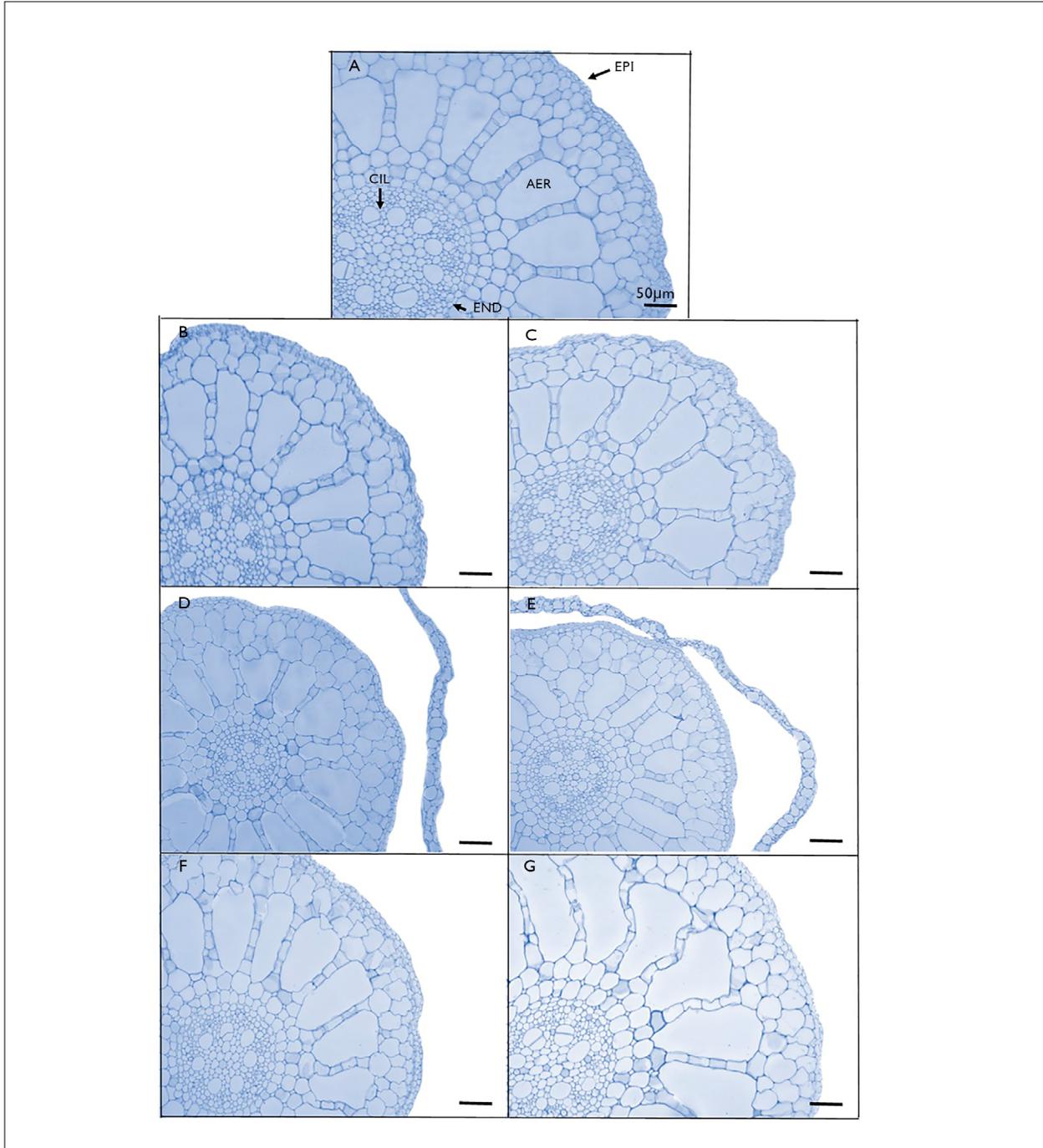


Figura 3. Secções transversais de raízes de *Pistia stratiotes* submetidas a diferentes concentrações de ETR: A) controle; B) 10 mM Ce; C) 40 mM Ce; D) 10 mM La; E) 40 mM La; F) Mix 1; G) Mix 2. Barras = 100 μm. Legendas: EPI = epiderme; END = endoderme; CIL = cilindro vascular; AER = aerênquima.

Figure 3. Cross sections of *Pistia stratiotes* roots subjected to different concentrations of REE: A) control; B) 10 mM Ce; C) 40 mM Ce; D) 10 mM La; E) 40 mM La; F) Mix 1; G) Mix 2. Bars = 100 μm. Captions: EPI = epidermis; END = endoderm; CIL = vascular cylinder; AER = aerenchyma.

Foi observado que La parece induzir um crescimento da coifa, influenciando a diferenciação no caliptrôgenio nas duas concentrações analisadas (0,01 e 0,04 mM de La), já que ela se alonga até a zona de ramificação da raiz. Possivelmente, como forma de

proteção dos tecidos meristemáticos (Figuras 4 e 5). Nota-se também o dano à região meristemática causada pelo La, podendo ser responsável pela redução do sistema radicular, em virtude do comprometimento da divisão celular.

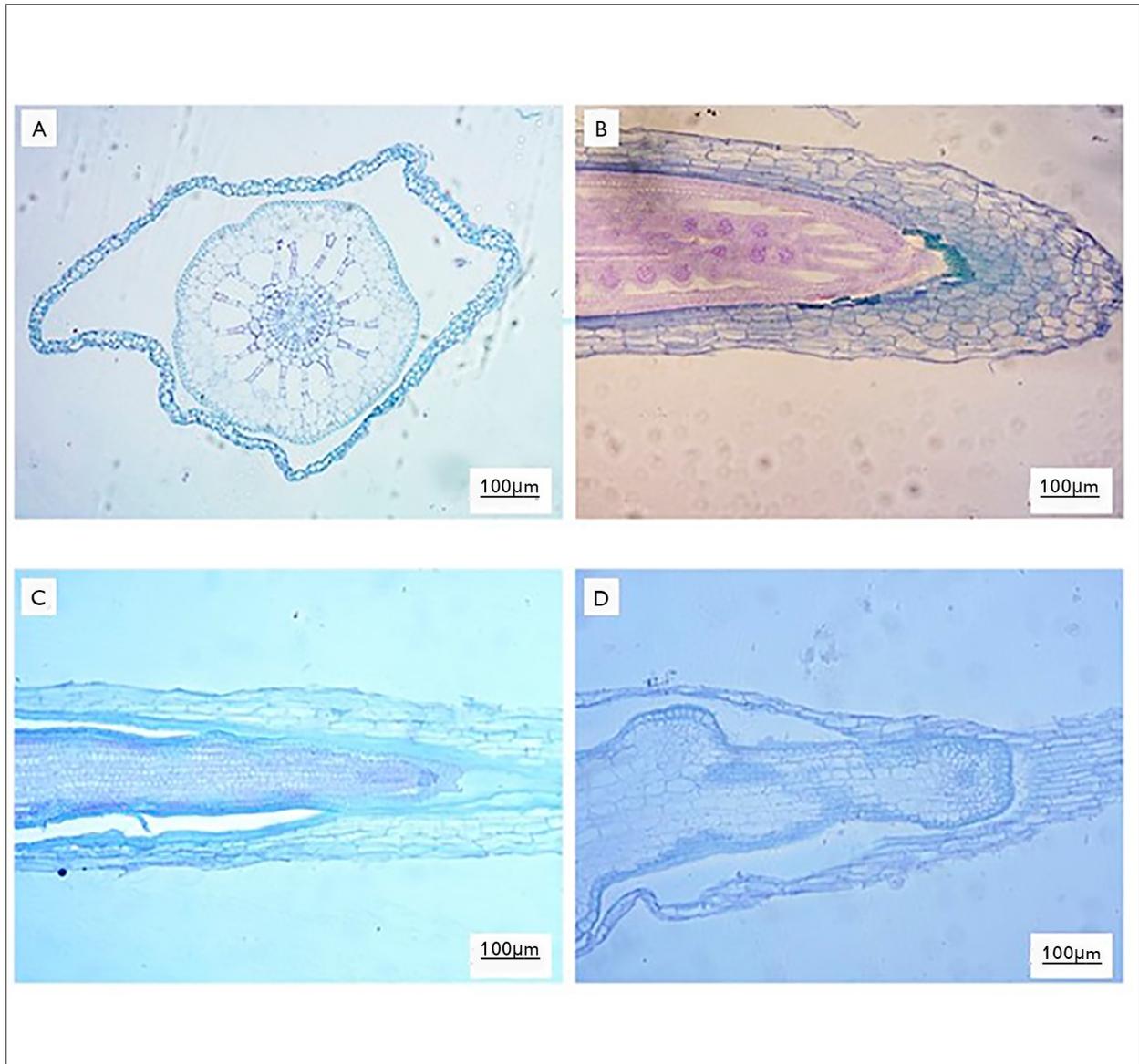


Figura 4. Seções transversal (A) e longitudinal (B-D) da raiz de *Pistia stratiotes* submetida ao tratamento com La. Seção longitudinal da raiz sem La (B) e submetida ao tratamento com La – 10 µM (C) e 40 µM (D). Barra: 100 µm.

Figure 4. Transverse (A) and longitudinal (B-D) sections of *Pistia stratiotes* root subjected to La treatment. Longitudinal section of the root without La (B) and submitted to treatment with La – 10 µM (C) and 40 µM (D). Bar: 100 µm.

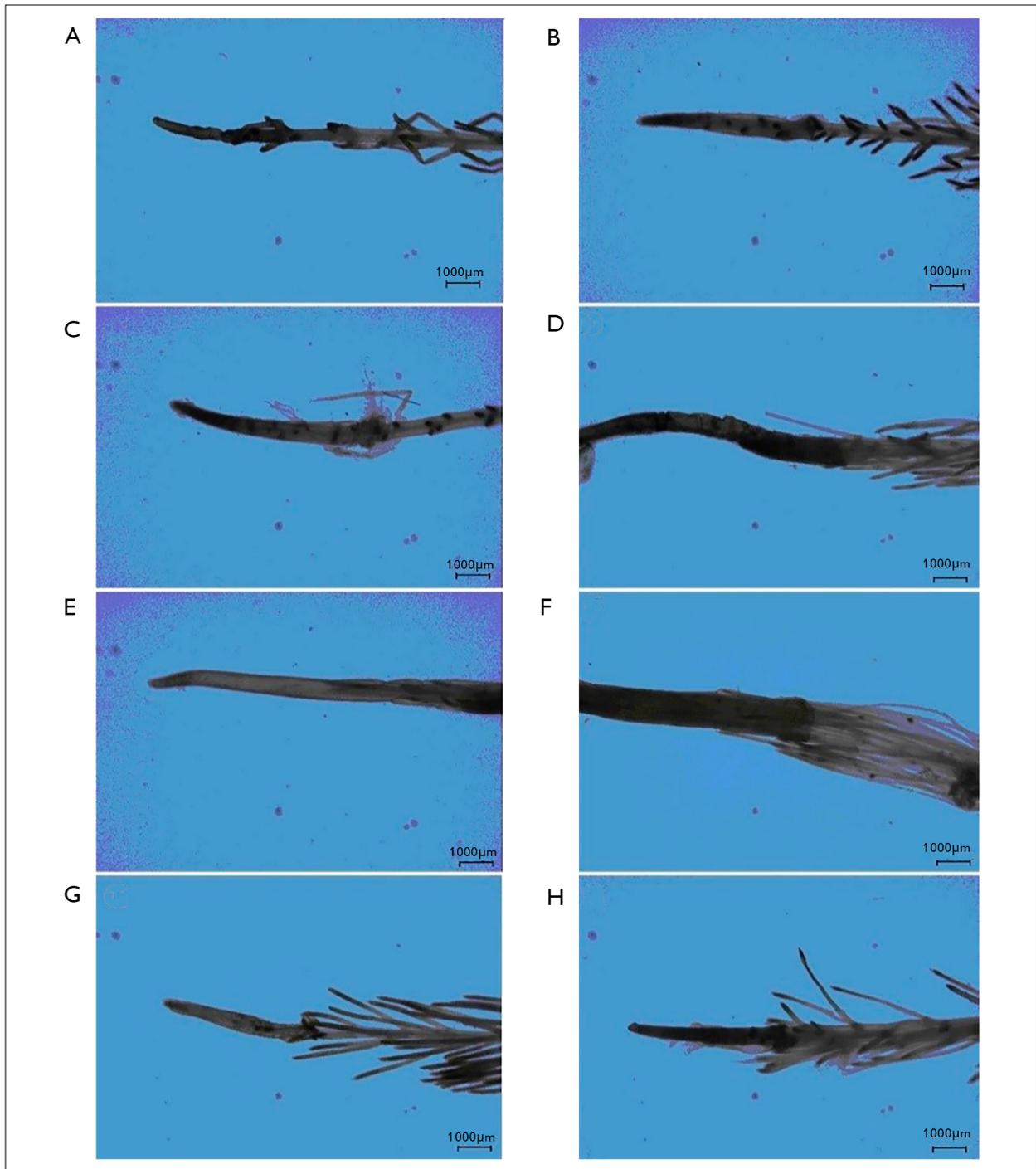


Figura 5. Raízes de *Pistia stratiotes* submetidas a diferentes concentrações de ETR: A) controle; B) 10 mM Ce; C) 40 mM Ce; D) 10 mM La; E e F) 40 mM La; G) Mix 1; H) Mix 2. Barras = 1000 μm .

Figure 5. *Pistia stratiotes* roots subjected to different concentrations of REE: A) control; B) 10 mM Ce; C) 40 mM Ce; D) 10 mM La; E and F) 40 mM La; G) Mix 1; H) Mix 2. Bars = 1000 μm .

DISCUSSÃO

Com a redução do sistema radicular nos tratamentos com La e misturas, conseqüentemente, a absorção de nutrientes também foi reduzida ou bloqueada pelo crescimento excessivo da coifa. A falta de micronutrientes, além de afetar o crescimento de órgãos vegetais, pode ainda interferir na atividade da enzima e dismutase do superóxido (SOD), fazendo com que as espécies reativas de oxigênio (EROS), que geralmente são produzidas pela presença de ETR, não sejam degradadas (Ramos et al., 2016). De forma geral, os macronutrientes analisados não tiveram alterações significativas, por estarem em concentrações mais elevadas e disponíveis na solução nutritiva. Há relatos de que estes ETR podem interferir no crescimento das plantas, afetando a distribuição e o teor de alguns elementos nelas, tais como Ca, Fe, Cu, K, P, Mg, dentre outros, afetando também a permeabilidade da membrana, a conformação ativa de algumas biomoléculas e, até mesmo, levando à desordem de funções biológicas (Wang et al., 2011). Segundo Wang et al. (2011), houve desequilíbrio nos elementos Ca, Fe e K com a adição de La em raízes de *Vicia faba* e, portanto, a progressão do ciclo celular e o alongamento da raiz podem ser alterados, devido ao desequilíbrio de nutrientes nas raízes submetidas a tratamento com La, o que também pode ter ocorrido neste trabalho. Em arroz, os teores de Mg, Ca, K aumentaram sob 0,08 mM de La (III), enquanto o conteúdo de Zn e Fe diminuiu (Zhang et al., 2018), interferindo, conseqüentemente, na fase inicial de crescimento, nutrição e crescimento reprodutivo vegetal. Zhang et al. (2018) observaram que a aplicação de La pode reduzir significativamente os teores de K, Mg e Zn nas raízes, enquanto que a quantidade de Na foi aumentada na parte aérea, sugerindo que alterações em K, especialmente nas raízes, podem explicar tais mudanças fisiológicas, considerando que as funções das raízes foram modificadas (Babula et al., 2015). Tais reduções nos teores de alguns elementos essenciais na presença de ETR elucidam efeitos claros de deficiência na parte aérea, que podem estar associados ao efeito tóxico dos ETR.

Destaca-se que os resultados dos poucos estudos existentes sobre o efeito de ETR no crescimento das plantas são conflitantes. Para *P. stratiotes*, foi notável a redução do crescimento das plantas submetidas aos tratamentos com La e Mix. Além disso, houve redução do sistema radicular nestes tratamentos, se comparado ao controle. No entanto, a menor razão entre parte aérea e raiz evita a absorção de grandes quantidades do elemento e também que o crescimento da planta seja afetado. A redução do sistema radicular nas plantas dos tratamentos com La e Mix pode ter ocorrido em razão da interferência dos elementos na divisão celular e, conseqüentemente, no alongamento das raízes, ou na própria zona meristemática. Hu et al. (2004) verificaram que o La causou inibição da divisão celular e alongamento da raiz de plantas de cevada. Ce e La também inibiram o crescimento de raiz em *Arabidopsis thaliana* (Ruíz-Herrera et al., 2012), milho e feijão (Diatloff et al., 1995). Saat e colaboradores (2015) também mostram que concentrações de até 1 mg L⁻¹ de Gd não interferiram no balanço de nutrientes, mas reduziram o crescimento da parte aérea em 67% e biomassa radicular em 35% em relação ao controle. Em trigo, a aplicação de elementos individuais ou mistura interferiu no alongamento relativo das raízes conforme doses de aplicação dos elementos: La < Y < Ce (Gong et al., 2019).

A fotossíntese é um dos processos fisiológicos mais sensíveis a diversos tipos de estresse, porém *P. stratiotes* mostrou ausência de interferência pontual na fotossíntese, já que A e g se mantiveram na presença de ETR. Porém, como as plantas reduziram o crescimento, a área foliar foi menor, fazendo com que a fotossíntese total também fosse reduzida. O aumento da transpiração ocorre para manutenção do fluxo de água e nutrientes, no entanto acaba por transportar mais La para a parte aérea e intensificar os efeitos negativos do elemento. Já foi relatado que Ce pode causar alterações na fotossíntese, por exemplo na taxa fotossintética em espinafre (Fashui et al., 2002), nas plântulas de soja (Li et al., 2007), na taxa fotossintética, na condutância estomática e na taxa transpiratória em

Salvia miltiorrhiza (Zhou et al., 2011a). O papel desempenhado pelos ETR em resposta ao estresse abiótico tem recebido recentemente considerações, principalmente devido aos seus efeitos multifuncionais na membrana citoplasmática, à fotossíntese e ao metabolismo hormonal (Hu et al., 2004). Um estudo com Y verificou que esse elemento estimulou a fotossíntese na macrófita *P. crispus*, aumentando a clorofila total conteúdo e eficiência quântica máxima/potencial do PSII (Fotossistema II) (Lyu et al., 2019).

A clorofila e outros pigmentos estão relacionados à resposta a diversos estresses (Kopsell et al., 2011). Como o teor de clorofila pontual foi mantido para a maioria dos tratamentos com ETR, as taxas fotossintéticas pontuais também foram mantidas. Apenas no tratamento de 0,01 mM de Ce e 0,04 mM de La houve redução no teor de clorofila, onde o pigmento poderia estar sendo degradado, como evidenciado pelas cloroses. Outros trabalhos também mostraram que os ETR podem influenciar a clorofila, por exemplo o de Wang & Zhao (2013), mostrando que o La e Ce reduzem o teor de clorofila em *Hydrilla verticillata*. A redução no teor de clorofila poderia ser decorrente da formação de clorofilase, que é responsável pela degradação da clorofila ou pela inibição da síntese de clorofila por ETR. Acredita-se que os ETR desempenham um papel indireto na formação da clorofila, porque Ce poderia entrar no cloroplasto e se ligar facilmente à clorofila, substituindo Mg (Hong et al., 2002). Tem sido sugerido que o Ce pode substituir o Mg no anel de porfirina de clorofila, vindo a aumentar o teor de clorofila (Wang & Zhao, 2013). Resultados da literatura relatam o aumento de clorofila total em plantas tratadas com baixas concentrações de Ce (Shyam & Aery, 2012; Li et al., 2007), o que não corrobora os dados encontrados neste estudo. A redução do teor de clorofila em *P. stratiotes* pode ter ocorrido pela baixa no teor de Mg na parte aérea, já que a maior parte absorvida permaneceu retida nas raízes, o que poderia afetar a síntese de clorofila e, conseqüentemente, reduzir o teor do pigmento nas plantas.

Acredita-se que as baixas concentrações de La afetem a transferência do gradiente de prótons de membrana e

melhorem o transporte de metabólitos e íons nas células, promovendo, assim, a absorção e utilização de elementos funcionais em cloroplastos (Liu et al., 2012). Já o excesso de La atinge o cloroplasto, competindo com íons metálicos, como Ca e Mg (Xie et al., 2002), substituindo estes íons na membrana do cloroplasto, na proteína metálica ou na enzimas, levando ao desequilíbrio dos elementos funcionais do cloroplasto (Wang et al., 2011). Quando La atinge um nível elevado de concentração, as EROS (*Species Reactive Oxygen*) no cloroplasto aumentam e a peroxidação lipídica da membrana é agravada (Liu et al., 2012), resultando, portanto, na destruição da estrutura dos cloroplastos e na perda de um grande número de elementos funcionais dessas organelas (Wang et al., 2012). Assim, as concentrações testadas no presente estudo foram consideradas baixas, por não causarem danos estruturais severos.

Os tecidos radiculares estão em contato direto com ETR, logo, podem ter modificações mais significativas, pois estão associados às exigências fisiológicas dos vegetais, como capacidade de absorção de água e nutrientes, influenciando a sobrevivência das plantas em ambientes aquáticos. O cério influenciou na expansão celular e em aumentos de tecidos foliares e radiculares. São relatados efeitos inibitórios de Ce em fotossíntese, respiração, captação e metabolismo de nutrientes minerais e no equilíbrio hormonal (Schwabe et al., 2015). Dentro das células, a toxicidade do Ce está associada a estresse oxidativo, danos à membrana e alteração das inúmeras atividades enzimáticas (Guo et al., 2007). Segundo Wason & Zhao (2013), em tratamento com 30 e 80 mM Ce, o tamanho médio das células diminuiu, comparado ao das células do tratamento-controle; em contraste, o número de células por mm² de área foi superior, como também, de forma contrária, o tratamento com Ce inibiu a expansão celular e promoveu a divisão celular prejudicial para o crescimento das folhas, síntese de clorofila e fotossíntese, como indução da peroxidação lipídica e danos à membrana, danificando a estrutura da membrana plasmática e diminuindo sua fluidez e elasticidade. Outro mecanismo de evitação a toxicidade ao ETR seria a formação de precipitados

insolúveis externamente à raiz, que não seriam absorvidos pelas plantas, evitando tais efeitos nocivos nos tecidos.

A distribuição dos ETR e sua influência nos tecidos da folha tendem a ocorrer de forma a minimizar e a prevenir danos à fotossíntese, que é a função essencial da folha, interferindo diretamente no crescimento da planta. Devido à plasticidade anatômica, algumas espécies desenvolvem modificações nos tecidos foliares que permitem melhor adaptação a diferentes fatores ambientais ou a estresse (Melo et al., 2009). A fotossíntese pontual foi mantida em virtude da manutenção da proporção dos tecidos foliares, principalmente do parênquima paliçádico.

Devido ao aumento do diâmetro dos elementos de vaso nas plantas do tratamento com La, associado ao aumento da transpiração, uma maior quantidade de La chegou à parte aérea e limitou o crescimento destas plantas. O Ce agiu ativamente na expansão celular, talvez por interação hormonal ou por alterar o estado osmótico das células. As câmaras de aerênquima podem ter aumentado em ambos os tratamentos contendo mistura de ETR em virtude da produção de EROS, como resposta ao estresse pelos ETR e, conseqüentemente, causaram apoptose nas células do mesofilo. A desintegração de células seguida por aumento no tamanho dos aerênquimas, e, portanto, na espessura do córtex, seria uma resposta à produção de etileno ou ao desbalanço de auxina (Santos, 2006), o que poderia também explicar o efeito de ETR no aumento da proporção de aerênquimas, da espessura do córtex e, conseqüentemente, da área total em raízes de *P. stratiotes*, já que há relatos de que ETR influenciam nos hormônios vegetais (Wang & Zhao, 2013).

O efeito de ETR nas plantas varia com as espécies e com suas condições de crescimento, uma vez que tais elementos podem entrar nas raízes em formas iônicas do solo, sendo pela primeira vez absorvidos em células epidérmicas, corticais ou endodérmicas, movendo-se depois através do contínuo citoplasmático até o tecido celular das raízes (Nagahashi et al., 1974). Os elementos terras raras no tecido vascular podem transferir ao topo da planta através do fluxo de água da transpiração, explicando elevação dos

teores dos mesmos na parte aérea. O espessamento de barreiras apoplásticas protege os tecidos internos da raiz do estresse presente no meio, reduzindo a translocação do elemento (Soares et al., 2001) e absorção de fitotoxinas para a parte aérea (Castro et al., 2009) reduzindo possíveis danos ao sistema fotossintético, evitando que o crescimento e o desenvolvimento da espécie sejam prejudicados. As plantas do tratamento com Ce tiveram suas barreiras espessadas, assim, uma menor quantidade do elemento chegou à parte aérea e os efeitos foram reduzidos.

Houve redução das barreiras e aumento do córtex nas plantas dos tratamentos Mix. Isso restringiria a condutividade, no entanto, o diâmetro dos vasos foi maior como forma compensatória para reestabelecer o fluxo. Como não houve diferença significativa na proporção do cilindro vascular, a condutividade hidráulica foi mantida. Um aumento na espessura do córtex nas maiores concentrações de ETR refletiu no diâmetro dessas raízes e pôde ser considerado também como uma estratégia de tolerância relacionada a uma maior capacidade de acúmulo dos elementos nos tecidos radiculares. No entanto, o aumento do diâmetro pode reduzir o fluxo de água e nutrientes para a parte aérea e interferir no crescimento da planta. A presença de ETR em altas concentrações foi encontrada em manchas na epiderme das raízes tratadas com esses elementos e poderia justificar seu espessamento e conseqüente redução do teor na parte aérea, segundo estudo de Saatz et al. (2015).

A influência de ETR no metabolismo da planta inclui as interações sinérgicas entre ETR e hormônios, interações essas que têm sido propostas como um dos meios mais importantes pelos quais os ETR podem influenciar os processos fisiológicos da planta, tais como o crescimento (Brown et al., 1990). No entanto, ainda não é claro se os ETR estão envolvidos com a sinalização dos hormônios vegetais. Segundo Wang et al. (2014), La interagiu com ABA (ácido abscísico) na regulação da germinação de sementes e para o crescimento, com efeito sobre a estrutura do meristema radicular pela indução de eventos de diferenciação, tais como

a formação de tricomas radiculares e de raízes laterais da raiz primária de *Arabidopsis*. A aplicação de La em elevados níveis poderia afetar a permeabilidade da membrana celular. Nagahashi et al. (1974) relataram que a endoderme de milho pode fornecer uma barreira à difusão de La^{3+} no apoplasto do córtex, substituindo Ca na estrutura da parede celular, o qual poderia até melhorar a estabilidade da planta. Estudos com o Ce^{3+} mostram que ele é capaz de substituir Mg no fotossistema II, deixando-o funcional (Zhou et al., 2011b). Dessa forma, o crescimento da coifa nos tratamentos com La no presente estudo pode ter sido induzido como forma de proteção, uma vez que as barreiras não foram capazes de reter a entrada dos elementos terras raras.

CONCLUSÕES

O efeito de elementos terras raras nas plantas varia com a espécie e suas condições de crescimento. Nas condições avaliadas, houve redução do crescimento das plantas e menor investimento no sistema radicular nos tratamentos com Mix e La. Porém, o teor de clorofila e fotossíntese pontuais se manteve nos 45 dias de experimento. A condutância estomática não foi afetada, assim *Pistia stratiotes* não apresentou problemas na captação de CO_2 . Houve aumento na transpiração para a manutenção do fluxo, compensando a perda de condutividade e permitindo a chegada de nutrientes até a parte aérea. A coifa aumentou nos tratamentos de La como forma de proteção. No entanto, pode ter bloqueado a absorção de outros nutrientes. A absorção de alguns macro e micronutrientes foi reduzida, em virtude da diminuição do sistema radicular, e as maiores quantidades dos elementos tenderam a permanecer na raiz. As barreiras foram espessadas nos tratamentos com Ce, logo, o elemento não chegou em grandes quantidades na parte aérea, evitando danos. Acredita-se que o La seja responsável pelos efeitos na mistura de ETR. Diante das modificações existentes na presença de ETR, *Pistia stratiotes* possui potencial para ser empregada em futuros estudos, uma vez que, nos teores testados, os ETR não interferiram negativamente na sobrevivência da espécie.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) e à Universidade Federal de Lavras (UFLA) (contrato de cooperação ITV/UFLA 020 Vale Terras Raras) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Akapo, A. A. R., Omidiji, S. O., & Otitolaju, A. A. (2011). Morphological and anatomical effects of crude oil on *Pistia stratiotes*. *The Environmentalist*, 31(3), 288-298. <https://doi.org/10.1007/s10669-011-9333-x>
- Babula, P., Klejdus, B., Kovacic, J., Hedbavny, J., & Hlavna, M. (2015). Lanthanum rather than cadmium induces oxidative stress and metabolite changes in *Hypericum perforatum*. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 334-342. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.060>
- Brown, P. H., Rathjen, A. H., Graham, R. D., & Tribe, D. E. (1990). Rare earth elements in biological systems. In K. A. Gschneider & L. Eyring (Eds.), *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* (Vol. 13, pp 423-450). North-Holland.
- Carpenter, D., Boutin, C., Allison, J. E., Parsons, J. L., & Ellis, D. M. (2015). Uptake and effects of six rare earth elements (rees) on selected native and crop species growing in contaminated soils. *PLoS One*, 10(6), e0129936. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129936>
- Castro, E. M., Pereira, F. J., & Paiva, R. (2009). *Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos*. UFLA.
- D'Aquino, L., Morgana, M., Carboni, M. A., Staiano, M., Antisari, M. V., Re, M., . . . & Woo, S. L. (2009). Effect of some rare earth elements on the growth and lanthanide accumulation in different *Trichoderma* strains. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(12), 2406-2413. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.012>
- Diatloff, E. et al. (1995). Effects of rare earth elements on the growth and mineral nutrition of plants. In *Rare Earths in agriculture Seminar*. Australian Academy of Technologies and Engineering.
- Fashui, H., Ling, W., Xiangxuan, M., Zheng, W., & Guiwen, Z. (2002). The effect of cerium (III) on the chlorophyll formation in spinach. *Biological Trace Element Research*, 8(3), 263-276. <https://doi.org/10.1385/bter:89:3:263>
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039-1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- Gong, B., He, E., Qiu, H., Li, J., Ji, J., Zhao, L., & Cao, X. (2019). Phytotoxicity of individual and binary mixtures of rare earth elements. *Environmental Pollution*, 246, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.106>

- González, V., Vignati, D. A. L., Pons, M.-N., Montarges-Pelletier, E., Bojic, C., & Giamberini, L. (2015). Lanthanide ecotoxicity: first attempt to measure environmental risk for aquatic organisms. *Environment Pollution*, 199, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.020>
- Guo, X.-S., Zhou, Q., Zhu, X.-D., Lu, T., & Huang, X.-H. (2007). Migration of a rare earth element cerium (III) in horseradish. *Acta Chimica Sinica*, 65, 1922-1924.
- He, J., Li, H., Ma, C., Zhang, Y., Polle, A., Rennenberg, H., Cheng, X., & Luo, Z.-B. (2015). Overexpression of bacterial g-glutamylcysteine synthetase mediates changes in cadmium influx, allocation and detoxification in poplar. *The New Phytologist*, 205(1), 240-254. <https://doi.org/10.1111/nph.13013>
- Herrmann, H., Nolde, J., Berger, S., & Heise, S. (2016). Aquatic ecotoxicity of lanthanum – a review and an attempt to derive water and sediment quality criteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 124, 213-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.033>
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular*, 347, 1-39.
- Hong, F. S., Wei, Z., & Zhao, G. (2002). Mechanism of lanthanum effect on the chlorophyll of spinach. *Journal Science in China, Series C*, 45(2), 166-176. <https://doi.org/10.1360/02yc9019>
- Hu, H., Richter, H., Sparovek, G., & Schnug, E. (2004). Physiological and biochemical effects of rare Earth elements on plants and their agricultural significance: A Review. *Journal of Plant Nutrition*, 12(1), 183-220. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027555>
- Huang, X. W., et al. (2007). Development status and research progress in rare earth industry in China. *Chinese Journal Rare Metals*, 31, 279-288.
- Johansen, D. A. (1940). *Plant microtechnique* (2nd ed.). Mc-Graw-Hill.
- Kopsell, D. E., Armel, G. R., Abney, K. R., Vargas, J. J., Brosnan, J. T., & Kopsell, D. E. (2011). Leaf tissue pigments and chlorophyll fluorescence parameters vary among sweet corn genotypes of differential herbicide sensitivity. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 99(2), 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.12.004>
- Kulaksiz, S., & Bau, M. (2011). Rare earth elements in the Rhine River, Germany: first case of anthropogenic lanthanum as a dissolved microcontaminant in the hydrosphere. *Environment International*, 37(5), 973-979. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.02.018>
- Li, Z., Zhanga, Z., Jianga, W., Yu, M., Zhou, Y., Zhao, Y., & Chai, Z. (2007). Direct measurement of lanthanum uptake and distribution in internodal cells of Chara. *Plant Science*, 174(5), 496-501. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.01.013>
- Liu, D., Lin, Y., & Wang, X. (2012). Effects of lanthanum on growth, element uptake, and oxidative stress in rice seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(6), 907- 911. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200016>
- Loell, M., Albrecht, C., & Felix-Henningsen, P. (2011). Rare earth elements and relation between their potential bioavailability and soil. *Plant and Soil*, 349, 303-317. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0875-y>
- Lyu, K., Wang, X., Wang, L., & Wang, G. (2019). Rare-earth element yttrium enhances the tolerance of curly-leaf pondweed (*Potamogeton crispus*) to acute nickel toxicity. *Environmental Pollution*, 248, 114-120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.120>
- Mancheri, N. (2015). World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications. *Resources Policy*, 46, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.009>
- Mao, L. J., Mo, D., Li, M., Zhou, K., Yang, J., & Guo, W. (2011). The rare Earth element compositions of sediments from the loess tableland in the Liyang Plain, southern China: implications for provenance and weathering intensity. *Environment Earth Science*, 62, 1609-1617. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0644-x>
- Melo, E. E. C., Costa, E. T. S., Guilherme, L. R. G., Faquina, V., & Nascimento, C. W. A. (2009). Accumulation of arsenic and nutrients by castor bean plants grown on an As-enriched nutrient solution. *Journal of Hazardous Materials*, 168(1), 479-483. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.048>
- Mishra, V. K., & Tripathi, B. (2008). Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. *Bioresource Technology*, 99, 7091-7097.
- Nagahashi, G., Thomson, W. W., & Leonard, R. T. (1974). The Casparian strip as a barrier to the movement of lanthanum in corn roots. *Science*, 183(4125), 670-671. <https://doi.org/10.1126/science.183.4125.670>
- O'Brien, T. P., Feder, N., & McCully, M. E. (1964). Polychromatic staining of plant cell walls by Toluidine Blue. *Protoplasm*, 59(2), 368-373.
- Protano, G., & Riccobono, F. (2002). High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area. *Environmental pollution*, 117(3), 499-514. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00173-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00173-7)
- Ramos, S. J., Dinali, G. S., Carvalho, T. S., Chaves, L. C., Siqueira, J. O., & Guilherme, L. R. G. (2016). Rare earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: Content, signature, and crystalline phases. *Journal of Geochemical Exploration*, 168, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.009>
- Redling, K. (2006). *Rare earth elements in agriculture with emphasis on animal husbandry*. Ludwig-Maximilians-Universität München.



- Romero-Freire, A., Minguez, L., Pelletier, M., Cayer, A., Caillet, C., Devin, S., . . . & Giamberini, L. (2018). Assessment of baseline ecotoxicity of sediments from a prospective mining área enriched in light rare earth elements. *The Science of the Total Environment*, 612, 831-839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.128>
- Ruíz-Herrera, L. F., Sánchez-Calderón, L., Herrera-Estrella, L., & López-Bucio, J. (2012). Rare earth elements lanthanum and gadolinium induce phosphate-deficiency responses in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant and Soil*, 353(1-2), 231-247. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1026-1>
- Saatz, J., Vetterlein, D., Mattusch, J., Otto, M., & Daus, B. (2015). The influence of gadolinium and yttrium on biomass production and nutrient balance of maize plants. *Environmental Pollution*, 204, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.03.052>
- Santos, C. L. (2006). *Acúmulo e toxidez de manganês em macrófitas aquáticas flutuantes livres* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa].
- Schwabe, F., Tanner, S., Schulin, R., Rotzetter, A., Stark, W., von Quadt, A., & Nowack, B. (2015). Dissolved cerium contributes to uptake of Ce in the presence of differently sized CeO₂-nanoparticles by three crop plants. *Metallomics*, 7, 466-477. <https://doi.org/10.1039/c4mt00343h>
- Shyam, R., & Aery, N. C. (2012). Effect of cerium on growth, dry matter production, biochemical constituents and enzymatic activities of cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(1), 1-14. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012000100001>
- Silva, S. A. E., Techio, V. H., Castro, E. M., Faria, M. R., & Palmieri, M. J. (2013). Reproductive, cellular, and anatomical alterations in *Pistia stratiotes* L. plants exposed to cadmium. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(3), 1454. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1454-z>
- Soares, C. R. F. S., Accioly, A. M. A., Marques, T. C. L. S. M., Siqueira, J. O., Moreira, F. M. S. (2001). Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 13(3), 302-315. <https://doi.org/10.1590/S0103-31312001000300006>
- Tyler, G. (2004). Rare earth elements in soil and plant systems: a review. *Plant and Soil*, 267(2), 191-206. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4888-2>
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (1998). *Level III ecoregions of the continental United States*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Wang, C., Lu, X., Tian, Y., Cheng, T., Hu, L., Chen, F., Jiang, C., & Wang, X. (2011). Lanthanum resulted in unbalance of nutrient elements and disturbance of cell proliferation cycles in *V. faba* L. seedlings. *Biological Trace Element Research*, 143(2), 1174-1181. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8939-z>
- Wang, C., Shi, C., Liu, L., Wang, C., Qiao, W., Gu, Z., & Wang, X. (2012). Lanthanum element induced imbalance of mineral nutrients, HSP 70 production and DNA-protein crosslink, leading to hormetic response of cell cycle progression in root tips of *Vicia faba* L. seedlings. *Dose-response: A Publication of International Hormesis Society*, 10(1), 96-10. <https://doi.org/10.2203/dose-response.11-041.wang>
- Wason, M. S., & Zhao, J. (2013). Cerium oxide nanoparticles: potential applications for cancer and other diseases. *American Journal of Translational Research*, 5(2), 126-131.
- Wang, J., Wang, L., Hu, T., Li, W., & Xue, S. (2014). Effects of lanthanum on abscisic acid regulation of root growth in *Arabidopsis*. *Journal of Rare Earths*, 32(1), 78-82. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60035-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60035-1)
- Wiseman, C. L. S., Pour, Z. H., & Zereini, F. (2015). Platinum group element and cerium concentrations in roadside environments in Toronto, Canada. *Chemosphere*, 145, 61-78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.056>
- Xie, Z. B., Zhu, J. G., Chu, H. Y., Zhang, Y. L., Zeng, Q., Ma, H. L., & Cao Z. H. (2002). Effect of lanthanum on rice production, nutrient uptake, and distribution. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 2315-2331. <https://doi.org/10.1081/PLN-120014078>
- Zhang, F., Hu, H., Wang, L., Zhou, Q., & Huang, X. (2018). Effects of rare earth and acid rain pollution on plant chloroplast ATP synthase and element contents at different growth stages. *Chemosphere*, 194, 441-449.
- Zhou, J., Guo, L., Zhang, J., Zhou, S., Yang, G., Zhao, M., & Huang, L. (2011a). Effects of LaCl₃ on photosynthesis and the accumulation of tanshinones and salvianolic acids in *Salvia miltiorrhiza* seedlings. *Journal of Rare Earths*, 29(5), 494-498.
- Zhou, M., Gong, X., Wang, Y., Liu, C., Hong, M., Wang, L., & Hong, F. (2011b). Improvement of cerium of photosynthesis functions of maize under magnesium deficiency. *Biological Trace Element Research*, 142, 760-772. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8769-z>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

A. C. O. Duarte contribuiu com investigação, metodologia e escrita (rascunho original); C. Oliveira com curadoria de dados e escrita (revisão e edição); E. M. Castro com administração de projeto, aquisição de financiamento e recursos; e S. J. Ramos com administração de projeto, aquisição de financiamento e supervisão.

