



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS



Universidade Federal de Minas Gerais

Instituto de Ciências Biológicas

Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre

**Respostas ecológicas de plantas de campos rupestres ferruginosos ao
aumento experimental de nutrientes**

Thaise de Oliveira Bahia

Belo Horizonte

2016



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS



Thaise de Oliveira Bahia

Respostas ecológicas de plantas de campos rupestres ferruginosos ao aumento experimental de nutrientes

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre.

Orientador: Dr. Geraldo Wilson Fernandes

Belo Horizonte

2016



Agradecimentos

Agradeço imensamente ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela oportunidade de aprender aqui no Brasil e nos cursos no exterior. Aos professores que me ajudaram a crescer em conhecimento, principalmente ao Fred Neves, Marco Melo e Lelê (Fernando Silveira). Aos secretários Fred e Cris pelo auxílio.

Agradeço ao IEF pela licença de coleta e aos funcionários do Parque Estadual do Rola Moça pela ajuda em campo.

Agradeço à Capes e ao CNPQ pelos financiamentos e pela bolsa.

Agradeço à FAPEMIG e a VALE S.A. pelo financiamento do projeto “Biodiversidade, ecoeficiência e sustentabilidade aplicados a restauração dos campos rupestres”.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Geraldo Wilson Fernandes pela confiança, paciência e pela grande ajuda. À reserva Vellozia pelo apoio logístico.

Agradeço ao Prof. Dr. Mauricio Quesada por me receber na Universidade Autónoma de México – Unidad Morelia – e pelos ensinamentos. E também aos colegas do laboratório de Ecología Evolutiva y Conservación de Bosques Tropicales por me receber com muito carinho e atenção.

Agradeço aos membros da banca: Tatiana Cornelissen, Daniel Negreiros, Marcel França, Alberto Teixeira e aos suplentes Yumi Oki e Newton Ulhôa por aceitarem esse convite e pelas sugestões na tese.

Agradeço ao Prof. Dr. Luis Dias e a Amanda Longhi pelas análises de tecido foliar.

Agradeço muito aos meus colegas e amigos do Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade por serem importantes companheiros. Principalmente, agradeço a cada um que me ajudou em campo e na elaboração desse trabalho (foi necessária muita ajuda para concluir, mas muita ajuda mesmo!). Não sei se vou lembrar de todos que foram a campo comigo, mas vou tentar: Erika, Henrique, Irene, Lucas Tameirão, Thiago, Geanne, Carol, João Vitor, Gilma, Claudio, Isabela, Gabriel, Lucas Félix, Pierre, Barbara e Agnello). Um agradecimento especial ao Hernani que foi muito mais do que uma ajuda, valeu filhote!



Obrigada a Marina e Irene pela ajuda com correções e abstracts. E ao Arleu pela ajuda com os gráficos.

Saindo do laboratório muitos deixaram de ser colegas e se tornaram amigos. Eles foram primordiais para diversão e sanidade mental: Hernani, Irene, Marina, Jana, Geanne, Fabiola, Carol, Giovana, Etiene, Leandra, Rodrigo, Fred, Leticia, Kele, Laura, Isabela, Matheus, Marcel, Arleu, Dudu, entre outros! Desculpa se eu esquecer de algum nome agora, mas é complicado escrever agradecimentos!

Não há palavras para eu descrever o tamanho da minha gratidão pela família que tenho. Obrigada por serem A MINHA FAMÍLIA! Agradeço pelo amor, apoio, confiança, incentivo e pela alegria de saber que poderia contar com vocês em qualquer situação! Pai, Mãe, Brenno, Thiago, Brenzinho, João Lucas, e as cunhadas Leia e Kaliny! Também à minha Avó, tias, tios e primos pelo estímulo!

Agradeço imensamente ao Felipe por me incentivar sempre, pela ajuda, pela paciência (principalmente nesses últimos dias) e por todo carinho! Você é muito importante para mim!

Agradeço aos meus amigos além da universidade por apoiar e incentivar sempre. Especialmente: êra, êra, êra!!



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS



”Mas na profissão, além de amar tem de saber. E o saber leva tempo pra crescer.”
Rubem Alves



Sumario

Introdução Geral.....	7
Referências.....	11
Capítulo 1 - Sobrevivência e crescimento de espécies vegetais de campos rupestres ferruginosos em resposta à adição experimental de nutrientes.....	15
Resumo.....	15
Abstract.....	16
Introdução.....	16
Métodos.....	18
Resultados.....	23
Discussão	36
Referências	39
Capítulo 2 - Acumulação de nutrientes em folhas de espécies de Asteraceae de campos rupestres ferruginosos sob diferentes condições nutricionais.....	45
Resumo.....	45
Abstract.....	46
Introdução.....	46
Métodos.....	48
Resultados.....	52
Discussão	56
Referências	60
Capítulo 3 - Adição experimental de nutrientes não reduz a assimetria flutuante em plantas de campos rupestres ferruginosos no Brasil.....	64
Resumo.....	64
Abstract.....	65
Introdução.....	65



Métodos.....	68
Resultados.....	74
Discussão	78
Referências	80
Material Suplementar 1 (Capítulo 1)	86
Material Suplementar 2 (Capítulo 1)	89



Introdução geral

Os campos rupestres ferruginosos são uma unidade fitogeográfica disjunta localizada acima de 900m do nível do mar e com alta diversidade de espécies, substratos e clima (Alves *et al.* 2014, Carmo *et al.* 2015, Schaefer *et al.* 2016). Algumas de suas áreas de ocorrência estão localizadas na Serra do Espinhaço que é um complexo montanhoso classificado como Reserva da Biosfera pela UNESCO (Silveira *et al.* 2016). Em um estudo nesse ambiente foram encontradas 1100 espécies de plantas vasculares em uma área menor do que 0,5 ha, demonstrando a elevada riqueza em uma pequena área (Jacobi & Carmo 2012). Os campos rupestres ferruginosos apresentam condições edafoclimáticas adversas de baixa produtividade e, para a vegetação, isso representa fortes filtros ambientais que resultaram em importantes adaptações e altos níveis de endemismo (Messias *et al.* 2012, Negreiros *et al.* 2014a, Carmo *et al.* 2015). Os solos são rasos apresentam em geral forte acidez, arenosos e com pouca capacidade de retenção de água, extrema deficiência nutricional, altos teores de ferro e outros metais pesados (Vincent & Meguro 2008; Messias *et al.* 2013, Fernandes 2016, Schaeffer *et al.* 2016).

A principal estratégia ecológica entre as espécies que colonizam campos rupestres é de estresse-tolerância devido aos fortes filtros ambientais, principalmente edáficos (Negreiros *et al.* 2014a). As espécies apresentam muitas adaptações morfológicas, fisiológicas e baixo requerimento nutricional que resultam em elevada capacidade de sobrevivência nesse ambiente (Teixeira & Lemos-Filhos 2002, Viana & Lombardi 2007, Messias *et al.* 2012, Carmo *et al.* 2015, Oliveira *et al.* 2016). São espécies capazes de absorver cátions e acumulá-los em seus tecidos (Teixeira & Lemos-Filho 1998, 2002; Messias *et al.* 2013). Há ainda uma forte convergência funcional em estratégias de nutrição mineral da planta entre os ecossistemas severamente empobrecidos (Oliveira *et al.* 2014). Além disso, altas concentrações de metais pesados são potencialmente tóxicas e podem representar um fator de estresse (Kazakou *et al.* 2008). A tolerância a metais varia em função da concentração, da sensibilidade da espécie, de forma que essa tolerância pode ser efeito da seleção por genótipos tolerantes ao longo do tempo (Antonovics 1975).



Um solo pobre em recursos minerais limita processos fisiológicos e de desenvolvimento das plantas (Chapin 1980). O estresse causado por essa limitação pode refletir em alterações na expressão do fenótipo e interferir no desenvolvimento normal de algumas estruturas dos organismos, como folhas (Møller & Swaddle 1997). Por consequência do estresse pode ocorrer também redução na *performance* de plantas ou ocorrência de adaptações que incluem crescimento lento, a baixa razão fotossintética, a baixa capacidade de absorção de nutrientes e mudanças no equilíbrio hormonal (Chapin 1991). Em solos onde ocorre limitação de recursos, as plantas precisam otimizar a alocação entre desenvolvimento e processos além de se ajustar fisiologicamente a curto prazo e a longo prazo (geneticamente) (Bloom *et al.* 1985).

Sob condições experimentais, por outro lado, algumas espécies de ambientes nutricionalmente pobres podem melhorar seu desenvolvimento e *performance* frente ao enriquecimento nutricional (Negreiros *et al.* 2009, 2014b). Algumas espécies respondem positivamente acumulando mais biomassa em raízes, caules e folhas (Fernandes *et al.* 2007, Negreiros *et al.* 2014b). Entretanto, essa resposta à variação nutricional dos solos pode diferir marcadamente entre espécies (Bloom *et al.* 1985, Tilman 1988, Tomlinson *et al.* 2012). A capacidade das espécies de apresentar respostas positivas e demonstrar variabilidade fenotípica frente aos fatores edáficos demonstra um importante fator adaptativo (Gedroc *et al.* 1996, Pearson *et al.* 2003, Negreiros *et al.* 2014b).

Neste estudo, motivados pela capacidade que as plantas que colonizam os campos rupestres ferruginosos apresentam de tolerar, sobreviver e se reproduzir em um ambiente com elevada pobreza nutricional e alta concentração de pesados, foi realizado um experimento (Figura 1) para testar as respostas ecológicas de espécies que ocorrem em campos rupestres ferruginosos ao enriquecimento nutricional do substrato. Esta tese está dividida em três capítulos: 1 – Foi avaliada a sobrevivência e crescimento de nove espécies de plantas (Figura 2) em respostas a diferentes condições nutricionais do substrato; 2 – Foi avaliado, em quatro espécies, se a variação morfométrica das folhas funciona como indicador do estresse nutricional ao qual as plantas crescendo em solos pobres nutricionalmente de campos rupestres ferruginosos estão submetidas; e 3 – Foi avaliado o efeito da adição de nutrientes na formação de biomassa de folhas e a acumulação de nutrientes nesse tecido em três espécies

de Asteraceae. As espécies foram selecionadas com base na ocorrência de frutificação no período de coleta e/ou no alto índice de valor de importância e cobertura descritos nos estudos fitossociológicos disponíveis para a área (ver Viana & Lombardi de 2007, Jacobi *et al.* 2007, Jacobi *et al.* 2008, Messias *et al.* 2012).



Figura 1: Experimento realizado para testar as respostas ecológicas de espécies que ocorrem em campos rupestres ferruginosos ao enriquecimento nutricional do substrato. A: recipientes (10 x 100 cm) utilizados para cultivo das plantas; B: Bandeja de semeadura com plantas de *Trixis vauthieri*; C: Diferentes substratos utilizados com plantas de *T. vauthieri*; e D: Plantas de *Copaiifera langsdorffii* após transplântio.

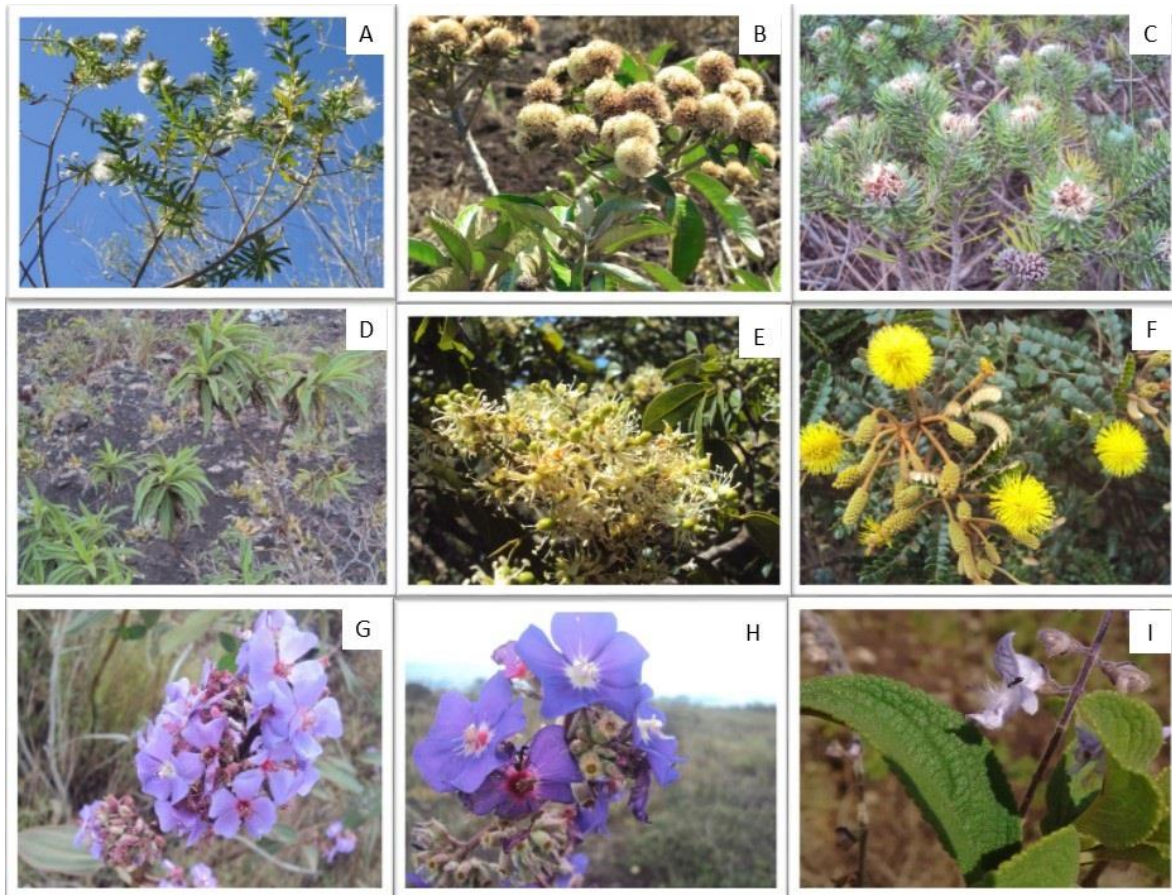


Figura 2: Espécies de plantas que ocorrem em campos rupestres ferruginosos utilizadas para testar as respostas ecológicas em função do enriquecimento nutricional do substrato. A: *Baccharis dracunculifolia*; B: *Eremanthus erythropappus*; C: *Lychnophora pinaster*; D: *Trixis vauthieri*; E: *Copaifera langsdorffii*; F: *Mimosa calodendron*; G: *Tibouchina heteromalla*; H: *Tibouchina candoleana*; e I: *Eriope macrostachya*. Foto A autora Rosângela G. Rolim; Fotos B, C, D, E, F, G e H autora Thaise de Oliveira Bahia; Foto I autor Lucas Tameirão.



Referências

- Alves R.J.V., Silva N.G., Oliveira J.A. & Medeiros D. 2014. Circumscribing campo rupestre– megadiverse Brazilian rocky montane savannas. *Brazilian Journal of Biology* 74(2): 355-362.
- Antonovics J. 1975. Metal Tolerance in plants: perfecting an evolutionary paradigm. *International Conference on Heavy Metals*: 169-183.
- Bloom A.J., F. Chapin III S. & Mooney H.A. 1985. Resource Limitation in Plants: An Economic Analogy. *Annual Review of Ecology and Systematics* 16: 363-392.
- Carmo F.F., Campos I.C. & Jacobi C.M. 2015. Effects of fine-scale surface heterogeneity on rock outcrop plant community structure. *Journal of Vegetation Science* 27(1): 50-59.
- Chapin F.S. III 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 11: 233-260.
- Chapin F.S. III 1991. Integrated responses of plants to stress. *BioScience* 41(1): 29-36.
- Fernandes G.W., Rodarte L.H.O., Negreiros D. & Franco A.C. 2007. Aspectos nutricionais em *Baccharis concinna* (Asteraceae), espécie endêmica e ameaçada da Serra do Espinhaço, Brasil. *Lundiana* 8: 83-88.
- Fernandes G.W. 2016. (Ed.) *Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. 574p.
- Gedroc J.J., McConnaughay K.D.M., & Coleman J.S. 1996. Plasticity in root/shoot partitioning: optimal, ontogenetic, or both? *Functional Ecology* 10: 44-50.
- Jacobi C.M.; Carmo F.F.; Vincent R.C. & Stehman J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity Conservation* 16:2185-2200.
- Jacobi C.M.; Carmo F.F. & Vincent R.C. 2008. Estudo fitossociológico de uma comunidade vegetal sobre canga como subsídio para a reabilitação de áreas mineradas no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Árvore* 32: 345-353.
- Jacobi, C.M. & Carmo, F.F. (orgs.). 2012. *Diversidade florística nas Cangas do Quadrilátero Ferrífero*. Ed. IDM, Belo Horizonte. 240p.



- Kazakou E., Dimitrakopoulos P.G., Baker A.J.M., Reeves R.D. & Troumbis A.Y. 2008. Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biological Review* 83: 495–508.
- Negreiros D., Fernandes G.W., Silveira F.A.O. & Chalub C. 2009. Seedling growth and biomass allocation of endemic and threatened shrubs of rupestrian fields. *Acta Oecologica* 35: 301-310.
- Negreiros D., Le Stradic S., Fernandes G.W. & Rennó H.C. 2014a. CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. *Plant Ecology* 215(4): 379-388.
- Negreiros D., Esteves D., Fernandes G.W., Barbara R.L.L., Oki Y., Vichiato M. & Chalub C. 2014b. Growth-survival tradeoff in widespread tropical shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae) in response to a nutrient gradient. *Tropical Ecology* 55(2): 167-176.
- Messias, M.C.T.B., Leite, M.G.P., Meira-Neto, J.A.A. & Kozovits, A.R. 2012. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Acta Botanica Brasilica* 26(1): 230-242.
- Messias, M.C.T.B., Leite M.G.P., Meira-Neto J.A.A., Kozovits A.R. & Tavares R. 2013. Soil-vegetation relationship in quartzitic and ferruginous Brazilian Rocky Outcrops. *Folia Geobotanica* 48: 509–521.
- MØller A.P. & Swaddle J.P. 1997. *Asymmetry, Developmental, Stability, and Evolution*. University Press, Oxford.
- Oliveira R.S., Galvão H.C., Campos M.C.R., Eller C.B., Pearse S.J. & Lambers H. 2014. Mineral nutrition of Campos Rupestres plant species on contrasting nutrient-impooverished soil types. *New Phytologist* 205(3): 1183-1194.
- Oliveira R.S., Abrahão A., Pereira C., Teodoro G.S., Brum M., Alcantara S. & Lambers H. 2016. Ecophysiology of campos rupestres plants. *In*: Fernandes G.W. (Ed.) *Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. Pp: 227-272.



- Pearson T.R.H., Burslem D., Goeriz R.E. & Dalling J.W. 2003. Regeneration niche partitioning in neotropical pioneers: effect of gap size, seasonal drought and herbivory on growth and survival. *Oecologia* 137: 456-465.
- Schaefer C.E.G.R., Corrêa G.R., Candido H.G., Arruda D.M., Nunes J.A., Araujo R.W., Rodrigues P.M.S., Fernandes-Filho E.I., Pereira A.F.S., Brandão P.C. & Neri A.V. 2016. The physical environment of rupestrian grasslands (campos rupestres) in Brazil: geological, geomorphological and pedological characteristics, and interplays *In: Fernandes G.W. (Ed.) Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil. Springer International Publishing, Switzerland. P: 15-53.*
- Silveira F.A.O., Negreiros D., Barbosa N.P.U., Buisson E., Carmo F.F., Carstensen D.W., Conceição A.A., Cornelissen T.G., Echternacht L., Fernandes G.W., Garcia Q.S., Guerra T.J., Jacobi C.M., Lemos-Filho J.P., Le Stradic S., Morellato L.P.C., Neves F.S., Oliveira R.S., Schaefer C.E., Viana P.L. & Lambers H. 2016. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and Soil* 403: 129–152.
- Teixeira W.A. & Lemos-Filho J.P. 1998. Metais pesados em folhas de espécies lenhosas colonizadoras de uma área de mineração de ferro em Itabirito, Minas Gerais. *Revista Árvore* 22:381-388.
- Teixeira W.A. & Lemos-Filho J.P. 2002. Fatores edáficos e a colonização de espécies lenhosas em uma cava de mineração de ferro em Itabirito, Minas Gerais. *Revista Árvore* 26: 25-33.
- Tilman D. 1988. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities. Monographs in Population Biology, Princeton University Press.*
- Tomlinson, K.W., Sterck, F.J., Bongers, F., da Silva, D.A., Barbosa, E.R., Ward, D. & Van Langevelde, F. 2012. Biomass partitioning and root morphology of savanna trees across a water gradient. *Journal of Ecology*, 100(5): 1113-1121.
- Viana, P.L. & J.A. Lombardi. 2007. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia* 58: 159-177.



Vincent, R.C. & Meguro, M.M. 2008. Influence of soil properties on the abundance of plants species in ferruginous rocky soils vegetation, southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Botânica* 3: 377-388.



Sobrevivência e crescimento de espécies vegetais de campos rupestres ferruginosos em resposta à adição experimental de nutrientes

Thaise de O. Bahia^{1,2}, Hernani A. Almeida¹, Daniel Negreiros^{1,3}, Mauricio Quesada⁴ & G. Wilson Fernandes¹

Resumo

As plantas de campos rupestres ferruginosos apresentam capacidade de tolerar e sobreviver em solos com elevada pobreza nutricional e metais pesados. Nesse estudo foram testadas as hipóteses: (i) a sobrevivência das plantas difere entre substratos com diferentes condições nutricionais; (ii) as espécies apresentam melhor crescimento frente a substratos com enriquecimento nutricional, quando comparado ao substrato controle. Foi realizado um experimento em que as plantas foram cultivadas por 150 dias plantas de nove espécies de quatro famílias em seis substratos: controle, três com diferentes níveis de NPK (4:14:8), um com adubação orgânica e outro com substrato comum para produção de mudas em viveiro. A porcentagem de sobrevivência não variou entre substratos, mas variou entre espécies (entre 40 e 100% de sobrevivência). As plantas de oito entre as nove espécies quando cultivadas em tratamento orgânico ou viveiro apresentaram maior crescimento e acúmulo de biomassa nas respostas avaliadas (até 10 vezes maior). A razão raiz-ramo, com poucas exceções, foi maior no controle e substratos com três níveis de NPK. Essas espécies já possuem adaptações funcionais para sobreviver nesse ambiente com fortes filtros ambientais. Essa capacidade demonstra elevada variabilidade fenotípica, visto que, mesmo sendo capazes de sobreviver em solo empobrecido de campo rupestre ferruginoso, essas plantas podem se adaptar captando os recursos disponíveis em solos mais férteis. Respostas específicas podem explicar a coexistência de comunidades ricas em espécies que favorece a divisão de nichos ao longo de um gradiente de recursos e diferentes estratégias adaptativas.

Palavras-chave: biomassa, canga, *performance* e estratégias adaptativas

¹ Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade, Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

² Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

³ Instituto de Ciências Biológicas e Saúde, Centro Universitário UNA, Belo Horizonte, Brasil.

⁴ Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Autonoma de México, Morelia, México



Abstract

Plants of ferruginous rupestrian grasslands have the capacity to tolerate and survive in soil with nutritional poverty and heavy metals. This study tested the following hypotheses: (i) the seedling survival differs between substrates with different nutritional conditions; (ii) the species have better performance in substrates with nutritional enrichment compared to the substrate control. We conducted an experiment in which we cultivated for 150 days seedlings of nine species of four plant families in six substrates: control, three with different levels of NPK (4: 14: 8), with organic fertilizer and another with a commercial substrate for nursery garden. The percentage of survival did not differ among substrates, but varied among species (between 40 and 100% survival). Eight seedlings out of evaluated nine species showed higher growth and accumulation of biomass in the assessed responses when grown in organic or commercial treatment (up to 10 times greater). The proportion root-branch, with few exceptions, was higher in the control and substrates with three NPK levels. These species already have functional adaptations to survive in this type of environment with strong environmental filters. This shows high phenotypic variability, as even being able to survive in poor soil of ferruginous rupestrian grasslands, these plants can adapt capturing the available resources in the most fertile soils. Specific responses may explain the coexistence of species communities that supports niches division along a gradient of resources and different adaptive strategies.

Key-words: biomass, *canga*, performance, adaptive strategies

Introdução

As condições edafoclimáticas adversas e de baixa produtividade dos campos rupestres representam fortes filtros ambientais que resultaram em importantes adaptações vegetais, altos níveis de endemismo (Messias *et al.* 2012, Negreiros *et al.* 2014a, Carmo *et al.* 2015), e em barreiras que limitam o crescimento e distribuição de espécies de plantas (veja Fernandes 2016a). Esses filtros podem ainda ser responsáveis pela coexistência e composição destas comunidades de plantas (Negreiros *et al.* 2014a, Carmo *et al.* 2015). Os solos associados apresentam em geral forte acidez, são rasos, arenosos, com pouca capacidade de



retenção de água e com extrema deficiência nutricional (Vincent & Meguro 2008; Messias *et al.* 2013, Fernandes 2016b, Schaeffer *et al.* 2016).

A principal estratégia ecológica entre as espécies que colonizam campos rupestres é de estresse-tolerância devido aos fortes filtros ambientais, principalmente edáficos, selecionando plantas com folhas menores, mais rígidas e mais estreitas, com alta esclerofila, maior tolerância ao stress e menor competitividade (Negreiros *et al.* 2014a). Essas espécies apresentam muitas adaptações morfológicas e fisiológicas e baixo requerimento nutricional que resultam em maiores taxas de sobrevivência (Teixeira & Lemos-Filhos 2002, Viana & Lombardi 2007, Messias *et al.* 2012, Carmo *et al.* 2015, Oliveira *et al.* 2016, Silveira *et al.* 2016). No campo rupestre ferruginoso, onde o solo também apresenta altos teores de alumínio, ferro e outros metais pesados, ocorrem espécies capazes de absorver cátions e acumulá-los em seus tecidos, como algumas espécies de Melastomataceae e Asteraceae (Teixeira & Lemos-Filho 1998, 2002; Messias *et al.* 2013). Por exemplo, a formação de biomassa epígea de espécies como *Microlicia crenulata* e *Copaifera langsdorffii* está intimamente relacionada com a capacidade de retenção de água e granulometria do solo (Teixeira & Lemos-Filho 2002).

Sob condições experimentais, por outro lado, algumas espécies de ambientes nutricionalmente pobres podem melhorar seu desenvolvimento e crescimento frente a substratos com enriquecimento nutricional (Negreiros *et al.* 2009, 2014b). Por exemplo, espécies do gênero *Baccharis* (Asteraceae) respondem positivamente acumulando mais biomassa em raízes, caules e folhas (Fernandes *et al.* 2007, Negreiros *et al.* 2014b). Embora essa resposta à variação nutricional dos solos possa diferir marcadamente entre espécies (Bloom *et al.* 1985, Tilman 1988, Cornelissen *et al.* 2003, Fernandes *et al.* 2007, Tomlinson *et al.* 2012). Tal capacidade das plantas de apresentar respostas positivas e demonstrar variabilidade fenotípica frente aos fatores edáficos demonstra um importante fator adaptativo (Gedroc *et al.* 1996, Pearson *et al.* 2003, Negreiros *et al.* 2014b).

Esta capacidade de adaptação das espécies quando ocorre uma mudança no solo pode ser importante para a diminuição da perda de biodiversidade devido a distúrbios antrópicos que alteram o solo (e.g., Jacobi *et al.* 2007, Jacobi & Carmo 2008). O campo rupestre, principalmente o ferruginoso, é alvo intenso da mineração e construção de estradas



(Fernandes *et al.* 2014, Carmo *et al.* 2015) e, devido à sua baixa resiliência as chances de ocorrer regeneração espontânea são remotas (e.g., Negreiros *et al.* 2009, 2011, Le Stradic *et al.* 2014, Fernandes *et al.* 2016c). Diante do grande impacto e da crescente conversão dos campos rupestres (Fernandes *et al.* 2014, 2016), o conhecimento sobre as respostas das plantas aos fatores edáficos se faz de grande importância.

Neste estudo, avaliamos a *performance* de nove espécies de plantas que ocorrem em campos rupestres ferruginosos em resposta a diferentes condições nutricionais experimentais. Motivados pela importante capacidade que essas plantas apresentam de tolerar, sobreviver e se reproduzir em um ambiente com elevada pobreza nutricional e altos níveis de metais pesados, testamos três hipóteses: (i) A sobrevivência das plantas difere entre substratos com diferentes condições nutricionais. Apesar dessas espécies colonizarem naturalmente a canga, onde os solos apresentam condições adversas, sua sobrevivência será positivamente influenciada pelo enriquecimento nutricional e consequente oferta de recursos. (ii) As espécies apresentam melhor *performance* de crescimento frente a substratos com enriquecimento nutricional, quando comparado ao substrato controle. Espera-se que plantas crescendo em solos com maior enriquecimento nutricional apresentariam maior biomassa, maior desenvolvimento (altura), maior número e tamanho de folhas. (iii) As plantas também apresentam menor razão raiz/ramo, ou seja, menor produção de raízes em condições de maior fertilidade do substrato. Em decorrência de maior oferta de nutrientes pode se esperar menor investimento em área para absorção de minerais e, com isso, a planta pode investir mais em parte aérea (caule e folha).

Métodos

Área de estudo

O experimento foi realizado entre setembro/2013 e janeiro/2015, em casa de vegetação localizada na Reserva Vellozia (19° 16' 45,7" S, 43° 35' 27,8" W), Minas Gerais. A coleta de sementes foi realizada em cinco locais diferentes no Parque Estadual Serra do Rola Moça, na região do Quadrilátero Ferrífero (Fig. 1) (Minas Gerais, Brasil), (20° 02' 42,3" S, 43 ° 59' 89,3" W – 20 ° 03' 60,3 " S, 044 ° 01' 90,5" W). A coleta de solo para o experimento foi realizada no entorno do parque devido a restrições à extração do solo dentro do mesmo.

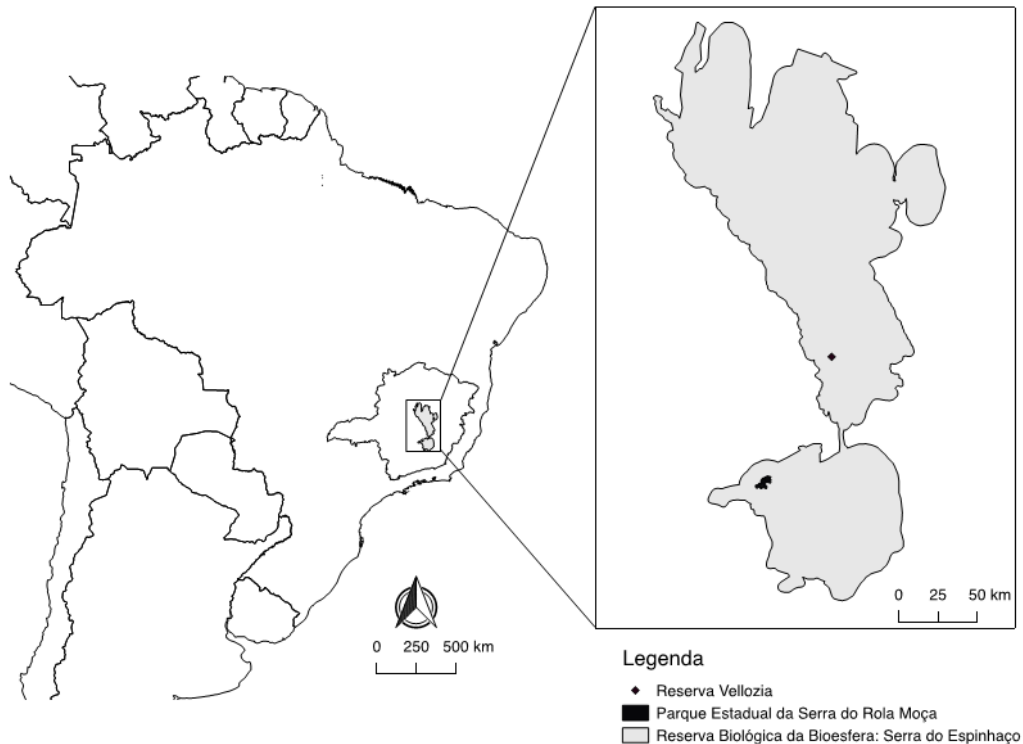


Figura 1: Mapa de localização do Parque Estadual Serra do Rola Moça (local de coleta) e da Reserva Vellozia (local do experimento) localizados dentro da Reserva da Biosfera: Serra do Espinhaço, Brasil.

Espécies estudadas

As espécies vegetais foram selecionadas com base na frutificação no período de coleta e/ou no alto índice de valor de importância e cobertura descritos nos estudos fitossociológicos disponíveis para na área (ver Viana & Lombardi de 2007, Jacobi *et al.* 2007, Jacobi *et al.* 2008, Messias *et al.* 2012). Nove espécies pertencentes a quatro famílias diferentes foram selecionadas: Asteraceae: *Baccharis dracunculifolia*, *Eremanthus erythropappus*, *Lychnophora pinaster* e *Trixis vauthieri*; Fabaceae: *Mimosa calodendron* e *Copaifera langsdorffii*; Melastomataceae: *Tibouchina heteromalla* e *Tibouchina candoleana*; Lamiaceae: *Eriope macrostachya*. Informações sobre aspectos da ocorrência, biologia e história natural das espécies são apresentadas no Material Suplementar 1.



Experimento

Foram coletados, de cada espécie, diásporos maduros de no mínimo 10 diferentes plantas/matriz. Os diásporos foram acondicionados em sacos plásticos identificados, posteriormente, foram triados em laboratório e aqueles que possuíam danos ou parasitas foram descartados. Para obtenção das mudas, os diásporos foram plantados em bandejas de isopor com substrato de vermiculita. Após 30 dias da germinação, as plantas foram aleatoriamente transferidas para cultivo nos tratamentos em recipientes plásticos (10cm de diâmetro e 100cm de profundidade, para que não houvesse limitação do crescimento radicular). Os recipientes foram arranjados em delineamento completamente casualizado (6 tratamentos \times 10 repetições), com um indivíduo por repetição, totalizando 60 indivíduos por espécie. As plantas foram cultivadas por um período de 150 dias. A casa de vegetação foi coberta por tela de sombrite (50%), as plantas foram irrigadas por micro aspersão, durante 10 minutos, duas vezes ao dia.

Para testar as hipóteses utilizamos seis tratamentos diferentes. Primeiramente todo o solo de coletado de campo rupestre ferruginoso foi triado manualmente para retirada de fragmentos rochosos maiores que 5 cm, sendo completamente misturado até a sua homogeneização. O tratamento controle foi composto somente pelo solo homogeneizado de campo rupestre ferruginoso. Para outros três tratamentos o solo homogeneizado recebeu a adição de dosagens crescentes de fertilizantes. O tratamento NPK foi composto pela dosagem 1500 g/m³ de NPK (4:14:8) (Vitaplan®) e 2000 g/m³ de calcário dolomítico. Outros dois tratamentos foram compostos por solo de campo rupestre ferruginoso com frações 10 e 100 vezes menores do que a dosagem acima de NPK e de calcário dolomítico (chamados NPK/10 e NPK/100, respectivamente) (veja Negreiros *et al.* 2014b). Essa é a formulação adequada para ser aplicada no preparo do solo para cultivo plantas arbóreas e arbustivas, visto que o alto teor de fósforo proporciona formação e desenvolvimento das raízes e das estruturas das plantas (Barros & Stringheta 1999). O tratamento Orgânico foi composto por solo de CRF com adubo orgânico (na proporção 2:1) produzido por compostagem de lixo orgânico (Biodeia®). A adubação orgânica altera a estrutura do solo e a capacidade de retenção de água, aumenta a atividade microbiana, modifica a retenção de cátions e ânions, dentre outros benefícios (Wadt 2003). Finalmente, em um outro tratamento utilizou-se substrato viveiro,



composto por partes iguais de terra, areia e composto orgânico (esterco bovino curtido) na proporção 3:2:1, respectivamente. Este tratamento apresenta as características químicas e físicas daqueles normalmente utilizados para a produção de mudas (Negreiros *et al.* 2009). O efeito deste tipo de substrato sobre as respostas das plantas permite avaliar a possibilidade de produzir tais espécies em larga escala, para utilização em programas de restauração ambiental.

Análise nutricional dos solos.

Os solos dos tratamentos foram analisados para descrição de suas características químicas. Para determinar o pH e conteúdo de Fe, N, P e K, uma amostra composta de cada tratamento foi enviada para análise pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (segundo protocolo do CFSEMG, 1999) (Tabela 1). Além disso, para determinação da capacidade de retenção de água no solo utilizamos amostras de cada tratamento em teste gravimétrico, como se descreve a seguir. As amostras foram levadas ao laboratório, armazenadas em sacos de papel identificado e colocadas para secagem em estufa a 110 °C por 48 horas. Após esse período foram pesadas em balança analítica e separados em 10 amostras de 100 g. As 10 amostras de cada tratamento foram umedecidas até a saturação, e, após a completa ausência de gotejamento, a porção foi novamente pesada para determinar o conteúdo de água (Novais *et al.* 1991).

Variáveis resposta

A porcentagem de sobrevivência das plantas no experimento foi calculada como número de indivíduos vivos de todas as espécies ao final dos 150 dias em relação ao total inicial. Para avaliar a *performance* de crescimento das plantas em resposta aos tratamentos foi realizada coleta destrutiva da planta. As raízes foram cuidadosamente lavadas com água sobre peneira de malha de 2mm, até a remoção completa das partículas de substrato aderidas. Posteriormente, foi registrado o comprimento total da plântula (desde a maior ponta da raiz à inserção do último par de folhas - mm) e o número total de folhas. Para determinação da produção de biomassa seca total, cada componente (raiz, caule e folhas) coletado das plantas foi ensacado individualmente, congelado e seco em estufa a 70°C, até atingir peso constante, e pesados em balança analítica (precisão de 0,001g). Com essas medidas foi calculado, a razão raiz/ramo (RRR): $RRR = MR / (MF + MC)$, onde: MR = massa seca de raízes total;;



MF = massa seca de folhas total; MC = massa seca de caule total conforme expressões descritas por Hunt (1982).

Para avaliar a área foliar foram medidas três folhas de cada um dos 60 indivíduos por espécie (total/espécie = 180 folhas). A área foliar indica importantes variações em fatores alométricos e estratégias evolutivas das espécies (Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013, Pierce *et al.* 2016). Para determinar a área foliar de cada espécie utilizamos um scanner de mesa e, as imagens digitalizadas foram analisadas utilizando o programa Sigma Scan Pro. As medidas de área foliar não foram mensuradas para *L. pinaster*, *T. heteromalla* e *T. candolleana*.

Análises Estatísticas

Para testar a variação da capacidade de retenção de água em cada de tratamento criamos um modelo linear generalizado (GLM) utilizando os tratamentos como variável preditora e o peso úmido do solo (g) como variável resposta. Para testar as hipóteses da sobrevivência e *performance* foram construídos GLM's. Dois modelos foram construídos para testar se a porcentagem de sobrevivência (variável resposta) variava em função do tratamento e da espécie (variáveis predictoras). Para a análise do efeito dos tratamentos sobre a *performance*, foram construídos nove modelos (um por espécie) em que a variável preditora foi o tratamento, enquanto as variáveis respostas foram: área foliar, número de folhas, razão raiz/ramo, biomassa seca total e comprimento total. Todos os modelos foram construídos utilizando uma distribuição de erros adequada para cada variável resposta, de acordo com a crítica ao modelo (Crawley 2013). As diferenças médias em cada variável resposta por tratamento foram avaliadas por análise de contraste (Crawley 2013).

Para avaliar o tamanho do efeito dos tratamentos sobre o conjunto de variáveis de cada uma das espécies estudadas, realizamos uma MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*). Esse tipo de análise de variância é indicada quando há mais de uma variável resposta, e, fazendo uma combinação linear entre elas obtêm-se um valor único do efeito da variável preditora (Legendre & Legendre 1983). Nesse caso também a variável preditora utilizada foi o tratamento, enquanto as variáveis respostas de cada uma das espécies foram: área foliar, número de folhas, razão raiz/ramo, biomassa seca total e comprimento total (esse modelo é diferente para as espécies *L. pinaster*, *T. candoleana* e *T. heteromalla* devido à ausência dos dados de área foliar).



Resultados

Análise nutricional dos solos

O substrato orgânico apresentou maior quantidade de P, N (Tabela 1). O substrato com maior quantidade de K foi Viveiro. O NPK apresentou pH mais básico. A maior quantidade de Fe disponível foi no NPK/100. Foram observadas diferenças na capacidade de retenção da água entre os tratamentos ($p < 0.05$, $F = 20.33$, $gl = 59$), sendo que o tratamento orgânico acumulou mais água, seguido pelo viveiro, enquanto os tratamentos controle, NPK, NPK/10 e NPK/100 apresentaram a mesma capacidade.

Tabela 1: Caracterização dos solos de acordo com os tipos de substratos e níveis de adubação utilizados no experimento, conteúdo de Fe (mg.Kg^{-1}), N (mg.Kg^{-1}), P (mg.Kg^{-1}), K (mg.Kg^{-1}), acidez e média do peso úmido do solo (g).

Tratamento (Substratos)	pH	Fe (mg/Kg)	N (mg/Kg)	P (mg/Kg)	K (mg/Kg)	Peso Úmido
Controle	5.62	28.8	2.49	3.46	7.39	126.0
NPK/100	6.21	35.1	1.66	2.05	14.2	129.0
NPK/10	6.28	27.6	1.19	15.6	151.1	129.0
NPK	7.19	23.6	1.58	30.3	106.5	127.5
Viveiro	6.08	16.8	1.03	257.4	868.1	133.0
Orgânico	6.19	30.6	4.88	281.6	185.3	143.0

Sobrevivência e crescimento

A porcentagem de sobrevivência das plantas ao final do experimento (150 dias) não variou em função do enriquecimento nutricional do substrato ($p < 0.55$, $df = 53$) (Fig. 2). Por outro lado, a porcentagem de sobrevivência variou entre espécies ($p < 0.001$, $df = 53$). As espécies com maior porcentagem de sobrevivência foram *Copaifera langsdorffii* com 100% de sobrevivência, as espécies *Trixis vauthiere* e *Tibouchina heteromalla* com 93%, depois *T. candoleana* (80%), *Eriope macrostachia* (78%), *Mimosa calodendron* (58%), *Baccharis dracunculifolia* (56%) e *Eremanthus erythropappus* (53%). Todas as plantas de *E. erythropappus* no tratamento orgânico morreram. A espécie com menor sobrevivência foi *Lychnophora pinaster* com 36% (Fig. 3). Dentre as espécies que menos sobreviveram três são da família Asteraceae.

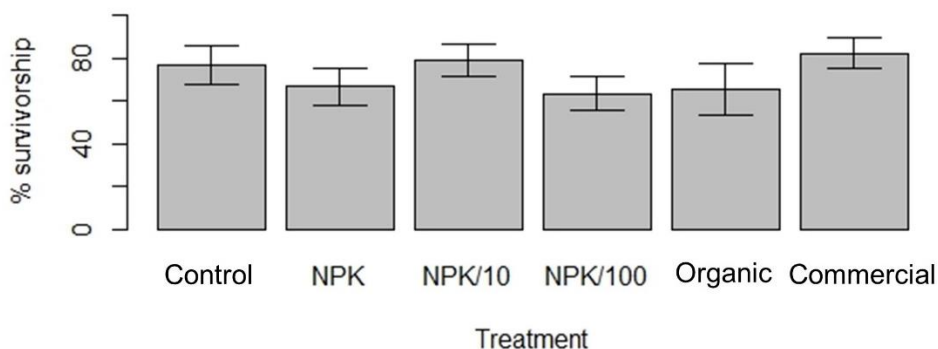


Figura 2: Porcentagem de sobrevivência média das plantas de todas as espécies em função do enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento ($p=0,55$, $df= 53$). Barras representam a média e a linha o erro padrão.

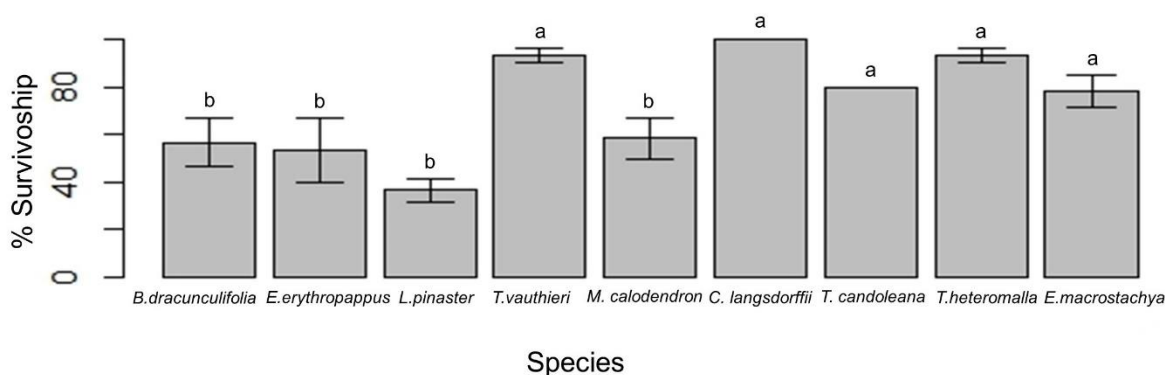


Figura 3: Porcentagem de sobrevivência das plantas em função da espécie após 150 dias de experimento ($p<0,001$, $df= 53$). Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

Corroborando a hipótese da resposta positiva à adição de nutrientes, as plantas dessas espécies (exceto *C. langsdorffii*) quando cultivadas em tratamento orgânico ou viveiro apresentaram melhor *performance* nas respostas avaliadas (até 10 vezes em maior magnitude, material suplementar 2), favorecendo-se da maior oferta de nutrientes e água. Essas espécies quando cultivadas no tratamento controle e nos tratamentos com NPK e frações, mais pobres



nutricionalmente e com alto conteúdo de Fe sofreram efeitos negativos quanto sua *performance*.

A *performance* das Asteraceae foi, em geral, mais influenciada pelos substratos orgânico e viveiro, em pelo menos 4 vezes em magnitude. A espécie arbustiva *B. dracunculifolia* foi influenciada pelo enriquecimento nutricional do substrato em quase todas as variáveis avaliadas (Fig. 4). Em comparação com os outros tratamentos, os indivíduos cultivados em substrato orgânico e viveiro produziram entre 4 e 6 vezes folhas maiores ($p < 0.001$, $df = 33$), em maior número ($p < 0.001$, $df = 33$), maior comprimento ($p < 0.001$, $df = 33$) e maior biomassa ($p < 0.001$, $df = 33$). No substrato controle as plantas apresentaram maior razão raiz/ramo ($p = 0.03$, $df = 33$), produzindo 5 vezes mais raízes. A *performance* da espécie arbórea *E. erythropappus* foi influenciada pelo enriquecimento nutricional do substrato (Fig. 5). A área foliar ($p < 0.001$; $df = 31$), comprimento total ($p < 0.001$; $df = 31$), biomassa seca total ($p < 0.001$; $df = 31$) e o número de folhas ($p < 0.001$, $df = 31$) também responderam positivamente aos tratamentos. Para essas variáveis, o tratamento viveiro foi o que exerceu maior influência nas respostas, com efeito até 5 vezes maior (Fig. 5). Para a razão raiz/ramo ($p = 0.01$, $df = 33$) a maior média foi no substrato NPK/100. A espécie arbustiva *L. pinaster* também teve sua *performance* influenciada pelo enriquecimento nutricional do substrato em todas as variáveis analisadas (Fig. 6). Os maiores valores médios de biomassa seca total ($p < 0.001$, $df = 21$), comprimento total ($p < 0.001$, $df = 21$) e número de folhas ($p < 0.001$, $df = 21$) foram no tratamento viveiro. A razão raiz/ramo ($p < 0.01$, $df = 21$) foi maior nos substratos (controle, NPK, NPK/10, NPK/100 e orgânico) com solo base de campo rupestre ferruginoso. A *performance* do arbusto *T. vauthieri* sofreu efeito positivo do enriquecimento nutricional do substrato em todas as variáveis analisadas (Fig. 7). Os maiores valores médios de número de folhas ($p < 0.001$, $df = 55$), área foliar ($p < 0.001$, $df = 55$), comprimento total ($p < 0.001$, $df = 55$) e biomassa seca total ($p < 0.001$, $df = 55$) foram observados no tratamento substrato orgânico. Para essa espécie razão raiz/ramo ($p < 0.001$, $df = 55$) também foi maior nos tratamentos com solo base de campo rupestre ferruginoso (controle, NPK, NPK/10, NPK/100 e orgânico).

A amplitude de resposta na *performance* das duas Fabaceae foi diferente, *C. langsdorffii* não responde ao enriquecimento nutricional do substrato em duas variáveis



estudadas, enquanto *M. calodendron* apresentam o dobro de amplitude de resposta em substratos orgânico e viveiro. A espécie arbórea *C. langsdorffii* respondeu positivamente ao enriquecimento nutricional do substrato (Fig. 8), produzindo mais folhas ($p < 0.001$, $gl = 59$) e mais biomassa seca total ($p < 0.001$, $gl = 59$) quando cultivadas em substrato NPK/10. A razão raiz/ramo ($p = 0.03$, $gl = 59$) foi menor no substrato orgânico e estatisticamente igual nos outros tratamentos. Não houve variação na área foliar e no comprimento total desses indivíduos em função do enriquecimento nutricional do substrato. A *performance* do arbusto *M. calodendron* variou em função do enriquecimento nutricional (Fig. 9). As maiores médias de área foliar ($p < 0.001$, $df = 34$), número de folhas ($p < 0.001$, $df = 34$), biomassa seca total ($p < 0.001$, $df = 34$) e no comprimento total ($p < 0.001$, $df = 34$) em função da melhoria nutricional foram no substrato viveiro, entre três e cinco vezes maior. A razão raiz/ramo ($p < 0.001$, $gl = 59$) foi maior nos substratos controle, NPK, NPK/10 e NPK/100.

As duas espécies de Melastomataceae foram positivamente influenciadas pelo substrato viveiro e, nos solos com base de campo rupestre ferruginoso (controle, adubações químicas e orgânica) sua *performance* foi menor. A espécie arbórea *T. candolleana* (Fig. 10) apresentou mais biomassa seca total ($p < 0.001$, $df = 47$), número de folhas ($p < 0.001$, $df = 47$) e maior comprimento total ($p < 0.001$, $df = 47$) no substrato viveiro. As maiores médias da razão raiz/ramo ($p < 0.001$, $df = 47$) foram no substrato controle e NPK/100. A espécie arbustiva *T. heteromalla* (Fig. 11) também apresentou maiores médias no substrato viveiro para biomassa seca total ($p < 0.001$, $df = 55$), comprimento total ($p < 0.001$, $df = 55$) e número de folhas ($p < 0.001$, $df = 55$) em pelo menos 4 vezes. A razão raiz/ramo ($p < 0.01$, $df = 55$) foi maior nos substratos NPK/10 e NPK/100, onde produziu mais caule.

A espécie arbustiva de Lamiaceae: *E. macrostachya*, teve sua *performance* influenciada pelo enriquecimento nutricional do substrato (Figura 11). Os efeitos maiores foram nos tratamentos orgânico e viveiro, para área foliar ($p < 0.001$, $df = 46$), número de folhas ($p < 0.001$, $df = 46$), comprimento total ($p < 0.001$, $df = 46$) e biomassa seca total ($p < 0.001$, $df = 46$). Para essas variáveis os indivíduos responderam entre 3 ou 4 vezes mais em magnitude. A razão raiz/ramo ($p < 0.001$, $df = 55$) foi maior no substrato NPK/100, onde produziu mais caule.



Quando analisado o efeito do enriquecimento nutricional do substrato em todas as variáveis resposta conjuntamente pode-se perceber um efeito positivamente para todas as espécies. Todavia, cada espécie apresentou amplitude diferente de resposta. As espécies *T. candoleanna* ($F(42)= 133.18$, $R^2= 0.898$, $p<0.001$) e *L. pinaster* ($F(16)= 3.529$, $R^2= 0.725$, $p<0.001$) foram aquelas em que o enriquecimento nutricional mais influenciou na *performance* e desenvolvimento. Seguidas por *E. macrostachya* ($F(41)= 7.387$, $R^2= 0.652$, $p<0.001$), *T. heteromalla* ($F(50)= 7.387$, $R^2= 0.591$, $p<0.001$), *B. dracunculifolia* ($F(28)= 4.955$, $R^2= 0.599$, $p<0.001$), *C. langsdorffi* ($F(54)= 5.634$, $R^2= 0.546$, $p<0.001$). As espécies que demonstraram menor efeito do enriquecimento nutricional na *performance* foram *T. vauthieri* ($F(50)= 7.142$, $R^2= 0.473$, $p<0.001$), *E. erythropappus* ($F(27)= 4.763$, $R^2= 0.453$, $p<0.001$) e *M. calodendron* ($F(29)= 4.746$, $R^2= 0.381$, $p<0.001$).

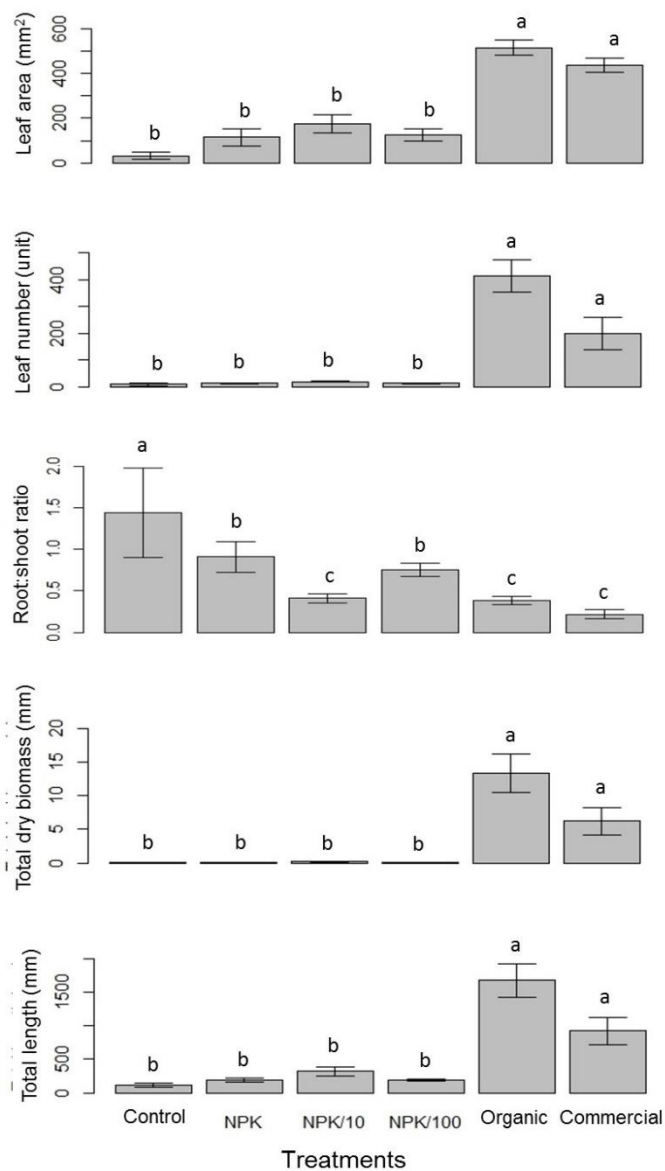


Figura 4: *Performance* de plantas de *Baccharis dracunculifolia* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

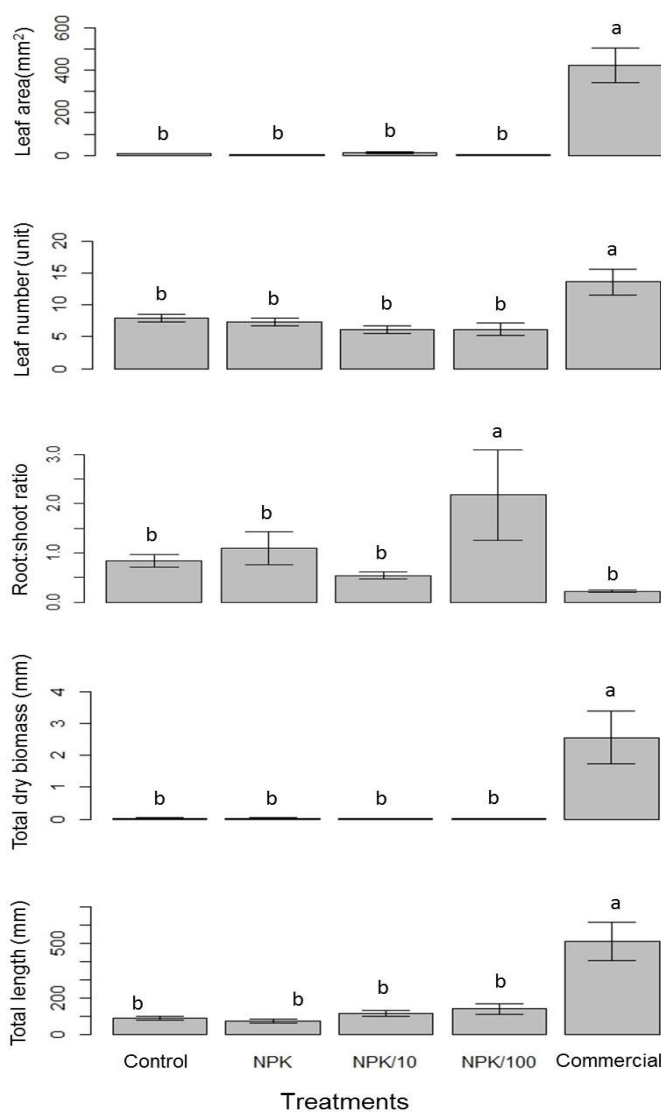


Figura 5: *Performance* de plantas de *Eremanthus erythropappus* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

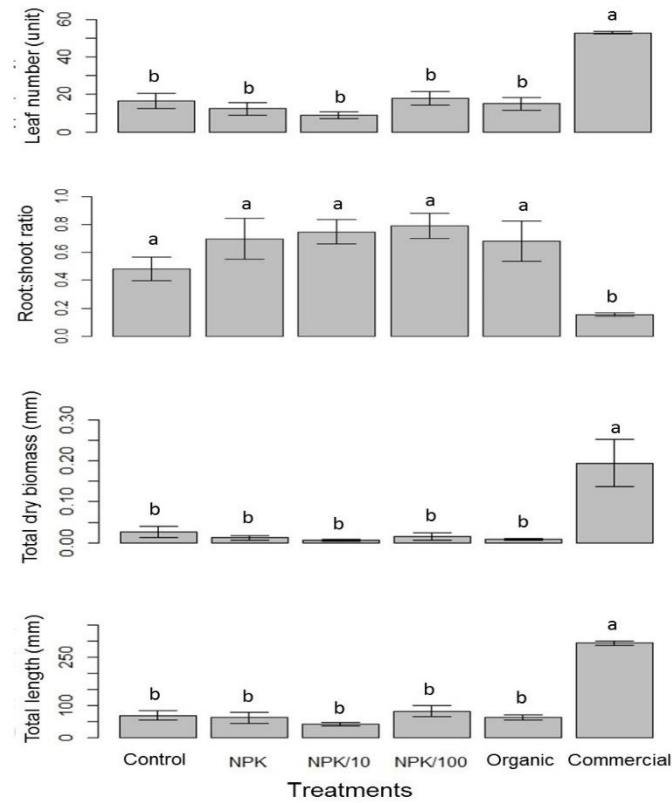


Figura 6: *Performance* de plantas de *Lychnophora pinaster* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

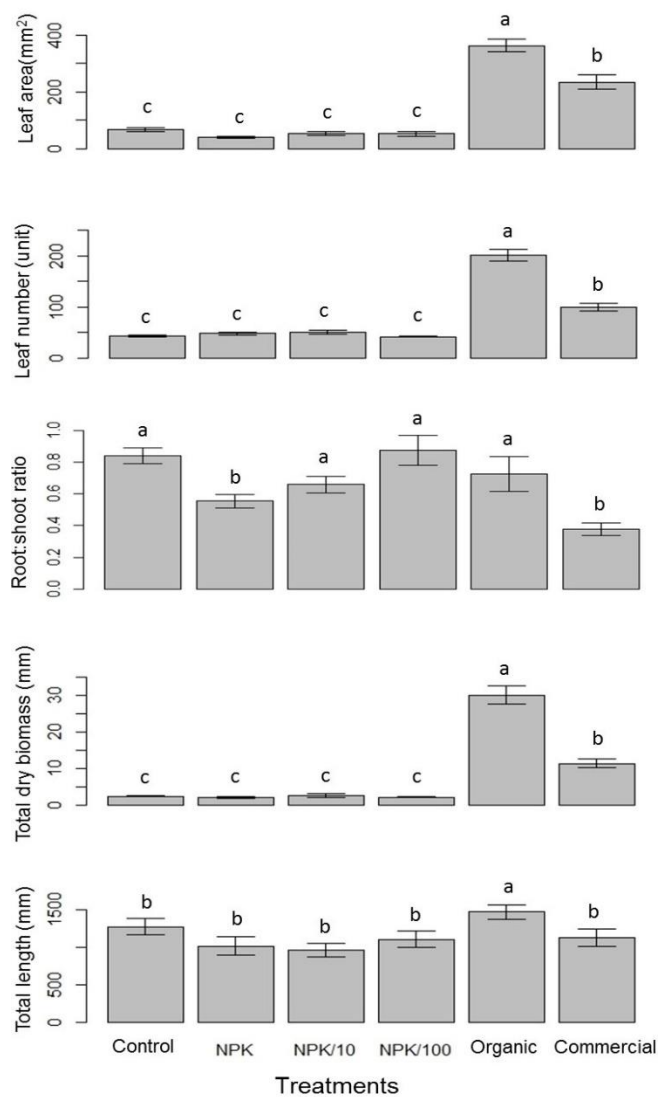


Figura 7: *Performance* de plantas de *Trixis vauthieri* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

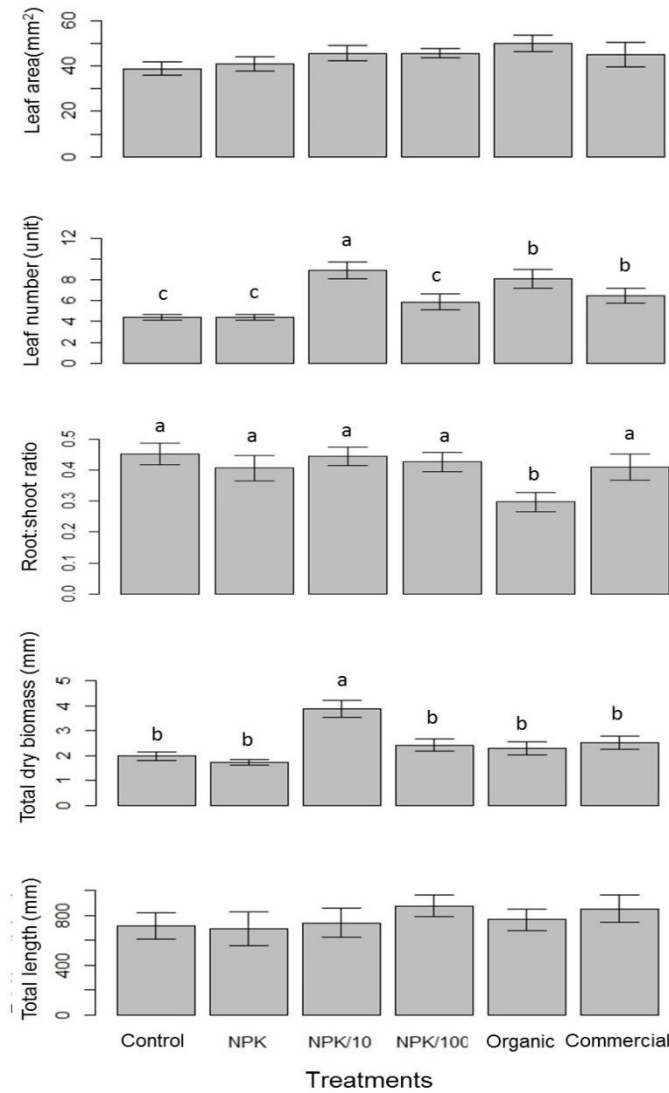


Figura 8: *Performance* de plantas de *Copaifera langsdorffii* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

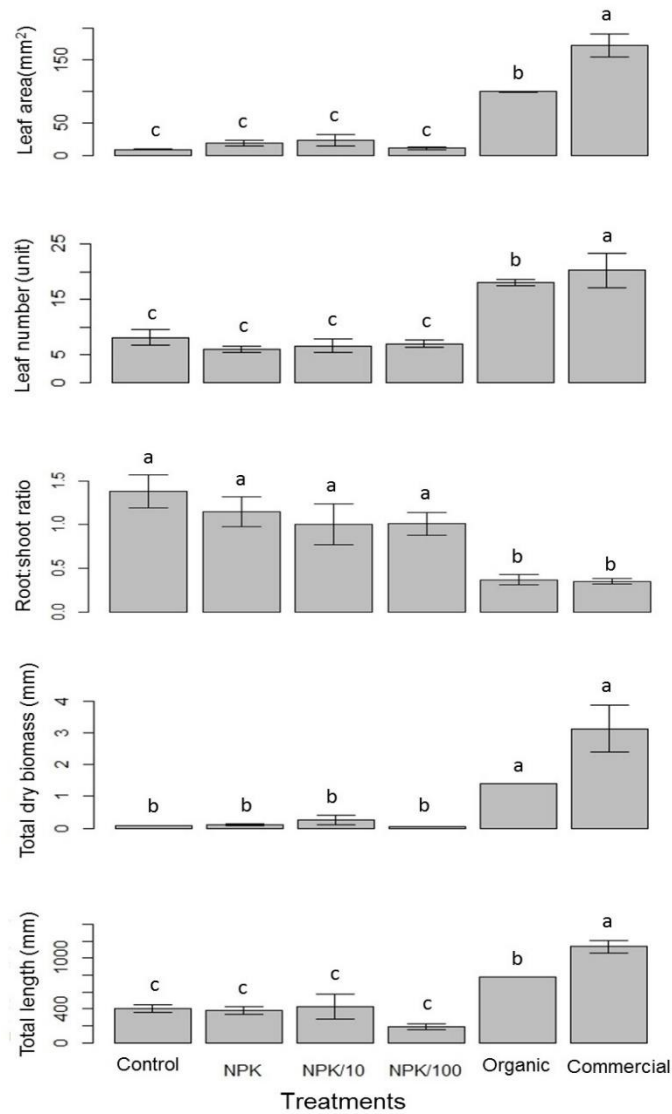


Figura 9: *Performance* de plantas de *Mimosa calodendron* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

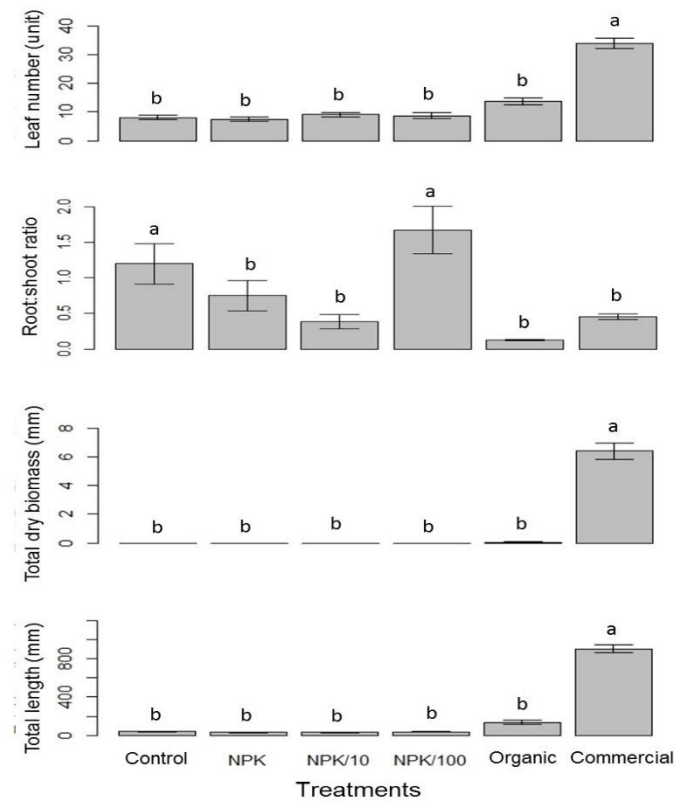


Figura 10: *Performance* de plantas de *Tibouchina candolleanna* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

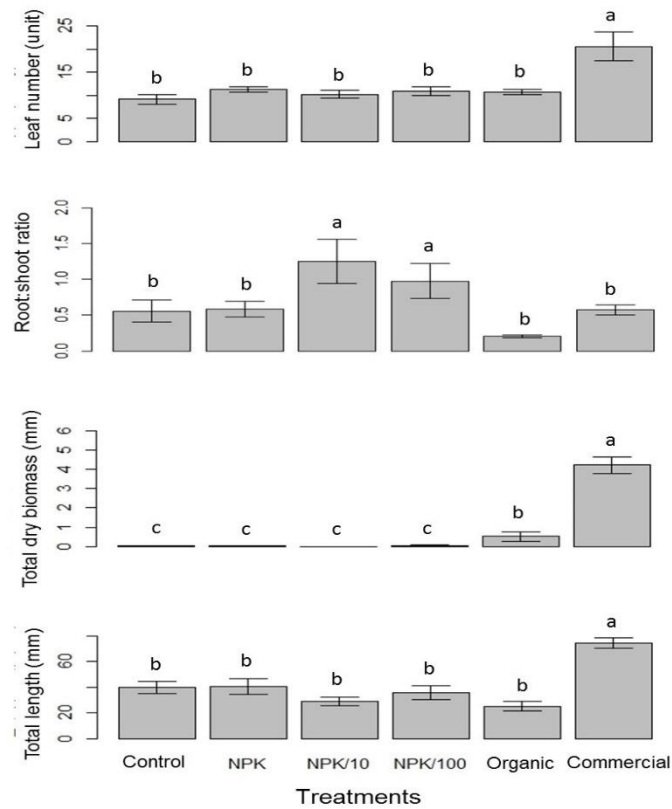


Figura 11: *Performance* de plantas de *Tibouchina heteromalla* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

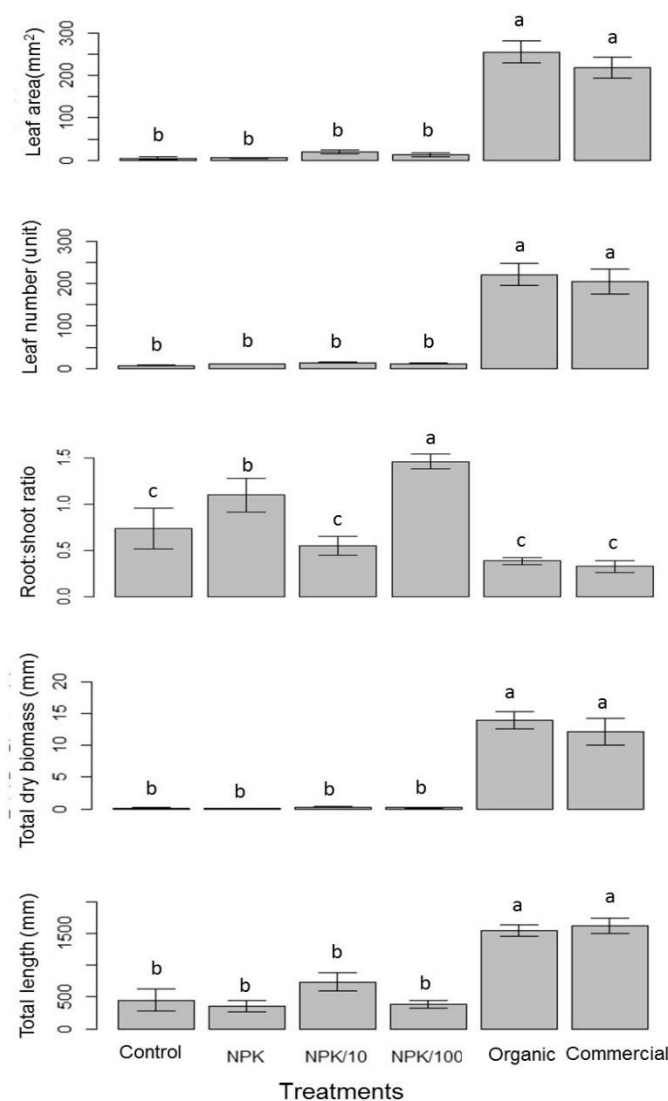


Figura 12: *Performance* de plantas de *Eriope macrostachya* em resposta ao enriquecimento nutricional do substrato após 150 dias de experimento. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

Discussão

A sobrevivência das plantas não foi influenciada pelo enriquecimento nutricional do substrato em comparação com o controle, composto por solo de campo rupestre ferruginoso. Mas a sobrevivência das plantas variou amplamente entre as espécies estudadas. Essas espécies, naturalmente, já possuem atributos capazes de passar pelos fortes filtros ambientais, como os elevados níveis de metais pesados, os solos que dificultam a penetrabilidade das



raízes, pouca capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes (Messias *et al.* 2013). Porém, a sobrevivência em ambientes adversos pode ser priorizada em substratos com baixa disponibilidade de nutrientes, enquanto em substratos enriquecidos as plantas alocam mais recursos para outras funções (Negreiros *et al.* 2014b). Esses *trade-offs* específicos também podem explicar a coexistência de comunidades ricas em espécies com atributos convergentes, de forma que permitem sucesso de colonização ao mesmo tempo que favorece a divisão de nichos ao longo de um gradiente de recursos e diferentes estratégias adaptativas (Negreiros *et al.* 2016). Além disso, quando plantas crescem em ambientes com baixa quantidade de recursos elas se adaptam fisiológica e morfológicamente para aumentar indiretamente a capacidade de resistência ao stress (Chapin *et al.* 2003).

As plantas de oito espécies entre as nove avaliadas cresceram e aumentaram sua biomassa com o enriquecimento nutricional no substrato orgânico e/ou viveiro em quase todas as variáveis analisadas. Diversos estudos têm indicado que sob deficiência mineral as plantas limitam seu crescimento, porém, quando restabelecidas concentrações ideais de nutrientes, água e solo, assim como nesse estudo, a planta consegue maximizar sua captação de recursos, fator que acrescenta uma vantagem ao seu crescimento (Larcher 2000). Outros estudos já demonstraram que algumas espécies dessa vegetação responderam positivamente a substratos de boas condições de fertilidade (Fernandes *et al.* 2007, Negreiros *et al.* 2009, 2014b, 2016). Essa variação no crescimento entre espécies pode demonstrar sua variabilidade fenotípica em relação à disponibilidade de recursos (Tilman 1988).

Há ainda uma forte convergência funcional em estratégias de nutrição mineral da planta entre os ecossistemas severamente empobrecidos em todo o mundo como demonstrando pela grande diversidade de especialização de raízes na maioria dos solos com deficiência de P (Oliveira *et al.* 2014). Uma vantagem nutricional para as plantas crescendo em substratos com altos níveis de nutrientes disponíveis é a diminuição da absorção de metais pesados, como o Pb, o que não acontece quando estas plantas estão em solos pobres em nutrientes, onde a absorção de metais pesados pelas folhas pode ser elevada (Foy *et al.* 1978). Em contrapartida, Ribeiro *et al.* (2016) sugerem que plantas de solos metalófilos podem usar os metais pesados disponíveis como defesa contra herbívoros, por exemplo espécies como *Byrsonima variabilis* que utilizam Mn para funções fisiológicas, como é comum, mas



também para defesa. Isto pode sugerir que plantas podem ter sucesso em colonizar ambientes como campos rupestres ferruginosos como forma de defesa contra herbívoros, por exemplo.

A capacidade de retenção de água no substrato foi outro fator condicionante para desenvolvimento dessas espécies. Houve aumento no crescimento e biomassa pelas plantas nos substratos orgânico e viveiro que apresentaram maior capacidade de retenção de água. Em ambientes do cerrado, os fatores hidrológicos e a capacidade de retenção da umidade do solo estão relacionadas com o tamanho das partículas e são os atributos mais influentes a estrutura da vegetação e variação da composição florística (Assis *et al.* 2011). As restrições hídricas podem ser uma forte pressão de seleção para a partição da biomassa vegetal, favorecendo a formação de raízes (Tomlinson *et al.* 2012). Um maior investimento em raízes pode ocorrer em solos com textura mais grossa onde ocorre mais perda de água, comparados com aqueles de textura mais fina (Figueiredo *et al.* 2016). Chapin *et al.* (1993) descrevem, em um experimento onde há manipulação genética, que em plantas mais sensível a estresse hídrico pode haver uma cascata de reações, culminando em baixa absorção de nutrientes e baixo crescimento. Assis *et al.* (2011) demonstraram ainda que a capacidade de retenção de água está relacionada não só com a quantidade de argila, mas com a estrutura e a capacidade de apoiar fisicamente a vegetação, aumentando a área basal da vegetação no cerrado

O crescimento das plantas de todas as espécies no tratamento controle não foi diferente daquele obtido nos tratamentos adubados quimicamente com NPK em vários níveis. Essas espécies, adaptadas ao solo pobre, apesar de manterem a mesma capacidade de sobrevivência não puderam captar esse tipo de recurso e crescer. Nesse sentido, em campos rupestres quaisquer pequenas diferenças nas características ambientais em fina escala já resultam em distintos aspectos funcionais e morfológicos nas plantas (Negreiros *et al.* 2014a). As adaptações para limitação de recursos podem, por exemplo, resultar na redução de suas taxas de crescimento e, por consequência, diminuir a troca de tecidos, reduzir a perda de outros nutrientes e dependência por novos recursos minerais, mas, principalmente, reduzir a perda de água e aumentar a eficiência fotossintética (Chapin *et al.* 1993). Oliveira *et al.* (2014) estudando espécies dominantes em campos rupestres apontam para a prevalência de grande número de raízes adventícias, sugerindo que esse tipo de raiz tem um papel importante na absorção de P e N a partir de partículas de solo.



As diferentes amplitudes de resposta de cada espécie ao enriquecimento nutricional do substrato podem ser explicadas, em parte, pela distribuição fitofisionômica das espécies estudadas. Estudos indicam que espécies de ocorrência restrita possuem fenótipos menos variáveis do que de espécies de ampla distribuição (Hermant *et al.* 2013). Para Chapin *et al.* (1993) plantas que evoluíram em ambientes com grande quantidade de recurso ambiental são geralmente mais plásticas em relação aos seus atributos funcionais, de forma que têm um espectro de respostas mais amplo do que as plantas que evoluíram em ambientes pobre em recursos. Outro fator é que existem plantas que crescem rapidamente e que precisam de mais recursos em uma fase da vida, e outras que possuem crescimento lento e maior longevidade (Negreiros *et al.* 2016). As plantas de crescimento lento apresentam características como a capacidade para acumular reservas, eficiente reabsorção de nutrientes durante a senescência, e grande investimento em compostos de defesa secundários (Chapin 1980).

As plantas das nove espécies estudadas possuem capacidade de sobrevivência alta, independente do substrato, porém essa capacidade varia entre elas. A maioria das espécies respondeu positivamente ao enriquecimento nutricional, principalmente em substratos com boa capacidade de retenção de água. Essas plantas cresceram mais e acumularam maior biomassa. Isso demonstra elevada variabilidade fenotípica, visto que, mesmo sendo capazes de sobreviver em solo empobrecido de campo rupestre ferruginoso, essas plantas podem se adaptar captando os recursos disponíveis em solos mais férteis. Além disso, essas respostas foram diferentes entre as espécies favorecendo múltiplos nichos nesses ambientes.

Referências

- Assis A.C.C., Coelho R.M., Pinheiro E.S. & Durigan G. 2011. Water availability determines physiognomic gradient in an area of low-fertility soils under Cerrado vegetation. *Plant Ecology* 212: 1135-1147.
- Barros N.F. & Stringheta A.C.O. 1999. Plantas ornamentais arbóreas e arbustivas. *In:* A.C. Ribeiro, P.T.G. Guimarães & V.A.V. Alvares (Eds.) *Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação*, CFSEMG, Viçosa. Pp. 273-276.



- Bloom A.J., Chapin F.S. III & Mooney H.A. 1985. Resource Limitation in Plants - An Economic Analogy. *Annual Review of Ecology and Systematics* 16: 363-392.
- Carmo F.F., Campos I.C. & Jacobi C.M. 2015. Effects of fine-scale surface heterogeneity on rock outcrop plant community structure. *Journal of Vegetation Science* 27(1): 50-59.
- Chapin F.S. III 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 11: 233-260.
- Chapin F.S. III, Autumn K. & Pugnaire, F. 1993. Evolution of suites of traits in response to environmental stress. *The American Naturalist* 142: S78-S92.
- Crawley M. J. 2013. *The R Book*. John Wiley and Sons. New York. 2 ed. 1060p.
- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. *Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação*, ed. A.C. Ribeiro P.T.G., Guimarães V.A., Alvares V. CFSEMG, Viçosa.
- Fernandes G.W., Rodarte L.H.O., Negreiros D. & Franco A.C. 2007. Aspectos nutricionais em *Baccharis concinna* (Asteraceae), espécie endêmica e ameaçada da Serra do Espinhaço, Brasil. *Lundiana* 8: 83-88.
- Fernandes G.W., Barbosa N.P., Negreiros D. & Paglia A.P. 2014. Challenges for the conservation of vanishing megadiverse rupestrian grasslands. *Natureza & Conservação* 12(2): 162-165.
- Fernandes G.W. 2016a. (Ed.) *Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. 574p.
- Fernandes G.W. 2016b. The Megadiverse Rupestrian Grassland. *In: Fernandes G.W. (Ed.) Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. 574p.
- Fernandes G.W., Toma T.S.P., Angrisano P. & Overbeck G. 2016c. Challenges in the Restoration of Quartzitic and Ironstone Rupestrian Grasslands. *In: Fernandes G.W. (Ed.) Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. 574p.



- Figueiredo M.A., Praça Leite M.G. & Kozovits A.R. 2016 Influence of soil texture on nutrients and potentially hazardous elements in *Eremanthus erythropappus*. *International Journal of Phytoremediation* 18(5): 487-493.
- Foy C.D., Chaney R. L. & White M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology* 29: 511-566.
- Gedroc J.J., McConnaughay K.D.M., & Coleman J.S. 1996. Plasticity in root/shoot partitioning: optimal, ontogenetic, or both? *Functional Ecology* 10: 44-50.
- Hermant M., Prinzing A., Vernon P., Convey P. & Hennion F. 2013. Endemic species have highly integrated phenotypes, environmental distributions and phenotype–environment relationships. *Journal of Biogeography* 40: 1583-1594.
- Hunt R. 1982. *Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis*. London: Edward Arnold.
- Jacobi C.M.; Carmo F.F.; Vincent R.C. & Stehman J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity Conservation* 16:2185-2200.
- Jacobi C.M. & Carmo F.F. 2008. The contribution of ironstone outcrops to plant diversity in the Iron Quadrangle, a threatened Brazilian landscape. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 37(4): 324-326.
- Jacobi C.M.; Carmo F.F. & Vincent R.C. 2008. Estudo fitossociológico de uma comunidade vegetal sobre canga como subsídio para a reabilitação de áreas mineradas no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Árvore* 32: 345-353.
- Larcher W. 2000. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: Rima. 531p
- Le Stradic S., Buisson E. & Fernandes G.W. 2014. Restoration of Neotropical grasslands degraded by quarrying using hay transfer. *Applied Vegetation Science* 17(3): 482-492.
- Legendre P. & Legendre L. 1983. *Numerical Ecology*. 2ed. 870p.
- Messias M.C.T.B., Leite M.G.P., Meira-Neto J.A.A. & Kozovits A.R. 2012. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Acta Botanica Brasilica* 26(1): 230-242.



- Messias M.C.T.B., Leite M.G.P., Meira-Neto J.A.A., Kozovits A.R. & Tavares R. 2013. Soil-vegetation relationship in quartzitic and ferruginous brazilian rocky outcrops. *Folia Geobotanica* 48:509-521.
- Negreiros D., Fernandes G.W., Silveira F.A.O. & Chalub C. 2009. Seedling growth and biomass allocation of endemic and threatened shrubs of rupestrian fields. *Acta Oecologica* 35: 301-310.
- Negreiros D., Fernandes G.W., Barbara R.L.L., Rodarte L.H.O. & Barbosa N.P.U 2011. Caracterização físico-química de solos quartzíticos degradados e áreas adjacentes à campos rupestres na Serra do Cipó, MG. *Neotropical Biology and Conservation* 6(3): 156-161.
- Negreiros D., Le Stradic S., Fernandes G.W. & Rennó H.C. 2014a. CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. *Plant Ecology* 215(4): 379-388.
- Negreiros D., Esteves D., Fernandes G.W., Barbara R.L.L., Oki Y., Vichiato M. & Chalub C. 2014b. Growth-survival tradeoff in widespread tropical shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae) in response to a nutrient gradient. *Tropical Ecology* 55(2): 167-176.
- Negreiros D., Fernandes G.W., Efremova A.A., Le Stradic S. & Neves A.C.O. 2016. Growth-survival trade-off in shrub saplings from Neotropical mountain grasslands. *South African Journal of Botany* 106:17-22.
- Novais R. D., Neves J. C. L., Barros N. D., Oliveira A. D., Garrido W. E., Araujo J. D., & Lourenço, S. 1991. Ensaio em ambiente controlado. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: Embrapa-SEA, 189-253.
- Oliveira R.S., Galvão H.C., Campos M.C.R., Eller C.B., Pearse S.J. & Lambers H. 2014. Mineral nutrition of Campos Rupestres plant species on contrasting nutrient-impooverished soil types. *New Phytologist* 205: 1183-1194.
- Oliveira R.S., Abrahão A., Pereira C., Teodoro G.S., Brum M., Alcantara S. & Lambers H. 2016. Ecophysiology of campos rupestres plants. *In*: Fernandes G.W. (Ed.) *Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. Pp: 227-272.



- Pearson T.R.H., Burslem D., Goeriz R.E. & Dalling J.W. 2003. Regeneration niche partitioning in neotropical pioneers: effect of gap size, seasonal drought and herbivory on growth and survival. *Oecologia* 137: 456-465.
- Pérez-Harguindeguy N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M.S., Cornwell W. K., Craine J.M., Gurvich D.E., Urcelay C., Veneklaas E. J., Reich P.B., Poorter L., Wright I. J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A.C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J.G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., vanderHeijden M.G.A., Sack L., Blonder B., Poschlod P., Vaieretti M.V., Conti G., Staver A.C., Aquino S. & Cornelissen J.H.C. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61(3): 167-234.
- Pierce S., Negreiros D., Cerabolini B. E., Kattge J., Díaz S., Kleyer M., Shipley B., Wright S.J., Soudzilovskaia N.A., Onipchenko V.G., van Bodegom P.M., Frenette-Dussault C., Weiher E., Pinho B.X., Cornelissen J.H.C., Grime J.P., Thompson K., Hunt R., Wilson P.J., Buffa G., Nyakunga O.C., Reich P.B., Caccianiga M., Mangili F., Ceriani R.M., Luzzaro A, Brusa G., Siefert A., Barbosa N.P.U., Chapin F.S. III, Cornwell W.K., Fang J., Fernandes G.W., Garnier E., Le Stradic S., Peñuelas J., Melo F.P.L., Slaviero A., Tabarelli M., & Tampucci D. 2016. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes worldwide. *Functional Ecology*. DOI: 10.1111/1365-2435.12722
- Ribeiro S.P., Londe V., Bueno A.P., Barbosa J.S., Corrêa T.L., Soeltl T., Maia M., Pinto D.V., Dueli, G.F., Sousa H.C., Kozovits A.R. & Nalini Jr, H.A. 2016. Plant defense against leaf herbivory based on metal accumulation: examples from a tropical high altitude ecosystem. *Plant Species Biology*. doi: 10.1111/1442-1984.12136.
- Schaefer C.E.G.R., Corrêa G.R., Candido H.G., Arruda D.M., Nunes J.A., Araujo R.W., Rodrigues P.M.S., Fernandes-Filho E.I., Pereira A.F.S., Brandão P.C. & Neri A.V. 2016. The physical environment of rupestrian grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: geological, geomorphological and pedological characteristics, and interplays *In: Fernandes G.W. (Ed.) Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil*. Springer International Publishing, Switzerland. P: 15-53.



- Silveira F.A.O., Negreiros D., Barbosa N.P.U., Buisson E., Carmo F.F., Carstensen D.W., Conceição A.A., Cornelissen T.G., Echternacht L., Fernandes G.W., Garcia Q.S., Guerra T.J., Jacobi C.M., Lemos-Filho J.P., Le Stradic S., Morellato L.P.C., Neves F.S., Oliveira R.S., Schaefer C.E., Viana P.L. & Lambers H. 2016. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and Soil* 403: 129-152.
- Teixeira W.A. & Lemos-Filho J.P. 1998. Metais pesados em folhas de espécies lenhosas colonizadoras de uma área de mineração de ferro em Itabirito, Minas Gerais. *Revista Árvore* 22: 381-388.
- Teixeira W.A. & Lemos-Filho J.P. 2002. Fatores edáficos e a colonização de espécies lenhosas em uma cava de mineração de ferro em Itabirito, Minas Gerais: *Revista Árvore* 26: 25-33.
- Tilman D. 1988. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. Monographs in Population Biology, Princeton University Press.
- Tomlinson, K.W., Sterck, F.J., Bongers, F., da Silva, D.A., Barbosa, E.R., Ward, D. & Van Langevelde, F. 2012. Biomass partitioning and root morphology of savanna trees across a water gradient. *Journal of Ecology*, 100(5): 1113-1121.
- Viana P.L. & Lombardi J.A. 2007. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia* 58:159-177.
- Vincent, R.C. & Meguro, M.M. 2008. Influence of soil properties on the abundance of plants species in ferruginous rocky soils vegetation, southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Botânica* 3: 377-388.
- Wadt P.G.S. 2003. *Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas*. (Ed.) Documentos, 90. Embrapa Acre. 29 p.



Acumulação de nutrientes em folhas de espécies de Asteraceae de campos rupestres ferruginosos sob diferentes condições nutricionais

Thaise de Oliveira Bahia^{5,6}, Amanda Longhi Cordeiro⁷, Luiz Eduardo Dias⁸, G. Wilson Fernandes²

Resumo

A absorção de nutrientes nas folhas reflete a oferta nutricional do solo e espera-se uma concentração equilibrada na acumulação entre macro e micronutrientes. O objetivo deste trabalho foi comparar, por meio de um experimento, o efeito da adição de nutrientes na formação de biomassa foliar e a acumulação de nutrientes nas folhas de três espécies de Asteraceae. Foram testadas as seguintes hipóteses: (i) as espécies acumulam maior biomassa nas folhas em resposta à adição de nutrientes no solo; e, (ii) o conteúdo de macro e micronutrientes varia de acordo com as condições nutricionais do solo. Para o experimento foram selecionadas três espécies: *Trixis vauthieri*, *Lychnophora pinaster* e *Baccharis dracunculifolia* que foram cultivadas em seis tratamentos com diferentes condições nutricionais: controle, três níveis de fertilização química, outro com adubação orgânica e um substrato de viveiro. Ao final de 150 dias foram coletadas as folhas e determinado o conteúdo de macro e micronutrientes. A formação de folhas nas espécies *T. vauthieri* ($F= 164.57$; $p< 0.001$) e *B. dracunculifolia* ($F= 11.296$; $p< 0.001$) foi aumentada em pelo menos 5 vezes frente à adubação orgânica, e de *L. pinaster* ($F= 18.918$; $p< 0.001$) foi 10 vezes maior no tratamento viveiro. O conteúdo foliar de macro e micronutrientes variou entre os tratamentos, com poucas exceções. A absorção dos elementos químicos disponíveis no solo depende da concentração, solubilidade e da capacidade de absorção das raízes. As espécies apresentaram diferente padrão de resposta, mesmo sendo filogeneticamente relacionadas, o que pode favorecer a diversidade de aspectos funcionais no ambiente.

⁵ Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade, Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

⁶ Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

⁷ Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil

⁸ Departamento de Solos, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil



Palavras-chave: *Baccharis dracunculifolia*, *Lychnophora pinaster*, metais pesados, *Trixis vauthieri*, tolerância

Abstract

The absorption of nutrients in the leaves reflects the nutritional supply of the soil and it is expected a balanced concentration in the accumulation of macro and micronutrients. The objective of this study was to compare, experimentally, the effect of nutrient addition in leaf biomass and accumulation of nutrients in the leaves of three Asteraceae species. The following hypotheses were tested: (i) the species accumulate higher leaf biomass in response to the addition of nutrients in the soil; and (ii) the macro and micronutrients varies with the nutritional status of the soil. For the experiment were selected three species: *Trixis vauthieri*, *Lychnophora pinaster* and *Baccharis dracunculifolia* grown in six treatments with different nutritional conditions: control, three levels of chemical fertilization, organic fertilization and with commercial substrate. At the end of 150 days the leaves were collected and the macro and micronutrients were determined. The leaves biomass in the species *T. vauthieri* ($F = 164.57$, $p < 0.001$) and *B. dracunculifolia* ($F = 11,296$ $p < 0.001$) was increased by at least five times with organic fertilizer, and *L. pinaster* ($F = 18,918$; $p < 0.001$) was 10 times higher in the nursery treatment. The leaf content of macro- and micronutrients varied between treatments, with few exceptions. The absorption of chemicals elements available in the soil depends on the concentration, solubility and the absorption capacity of the roots. The species showed different pattern of response, even though the species were phylogenetically related, which may support the diversity of functional aspects of the rupestrian grasslands.

Key-words: *Baccharis dracunculifolia*, heavy metal, *Lychnophora pinaster*, *Trixis vauthieri*, tolerance

Introdução

Os campos rupestres ferruginosos apresentam solos com baixa fertilidade, ácidos, rasos, com elevados teores óxidos de ferro e metais pesados (Jacobi & Carmo 2011, Messias *et al.* 2012, Schaefer *et al.* 2016). Estão localizados acima de 900m do nível do mar e com alta diversidade de substratos, clima e elementos florísticos e rica em espécies raras e



endêmicas, com elevada diversidade beta (Jacobi *et al.* 2008a; Giuliatti *et al.* 2009; Alves *et al.* 2014, Carmo *et al.* 2015). Algumas das áreas de campos rupestres ferruginosos estão localizadas na Serra do Espinhaço que é um complexo montanhoso classificado como Reserva da Biosfera pela UNESCO, inserido numa zona ecotonal entre o Cerrado e a Mata Atlântica, considerados *hotspots* de biodiversidade (Silveira *et al.* 2016). O número de espécies em campo rupestre ferruginoso pode chegar a 1100 plantas vasculares em uma área menor do que 0.5 ha (Jacobi & Carmo 2012). Esse ambiente é considerado ao mesmo tempo como um antigo refúgio para a flora e como área para especiações recentes (Silveira *et al.* 2016).

Em solos em que o recurso mineral é limitado, como ocorre em campos rupestres, as plantas podem utilizar a estratégia de crescimento lento e pequeno porte para superar a deficiência nutricional (Negreiros *et al.* 2014a). Isso acontece porque o crescimento das plantas é delimitado, geralmente, pelo nutriente em que está em déficit, mesmo que haja oferta normal de outros nutrientes. Em outros casos onde há em alta concentração de alguns elementos no solo, eventualmente, excessos de determinados nutrientes podem ser absorvidos (Larcher 2000). Além disso, a razão de assimilação e acumulação nutricional depende não só da oferta de nutrientes na superfície da raiz, mas também da capacidade de absorção pelas células do córtex radicular (Chapin 1980). As plantas priorizam, normalmente, o equilíbrio na concentração de macro e micronutrientes e não a quantidade, devido ao funcionamento normal dos processos metabólicos e crescimento normal (Sadeghzadeh 2013).

Uma ferramenta eficiente para avaliar a deficiência de nutrientes nos solos é por meio da comparação da biomassa das plantas e o estoque de nutrientes nos tecidos. Essas avaliações podem indicar valores críticos dentro da normalidade para conteúdo de nutrientes foliares. Porém, o conceito de normalidade para plantas silvestres é controverso porque há muitas peculiaridades na fisiologia de cada espécie e do ambiente (Chapin 1980, Teixeira & Lemos-Filho 1998). Inúmeros trabalhos sobre a concentração de nutrientes foram realizados para uma variedade espécies, de órgãos da planta, condições ambientais e diferentes locais (veja em Ricklefs & Matthew 1982, Thompson *et al.* 1997, Alonzo & Herrera 2001, Basta *et al.* 2005, Freitas *et al.* 2015), porém, poucos são realizados com plantas silvestres e nenhum



deles estabelece valores críticos de acumulação levando em consideração as variações inter e intraespecíficas, especialmente quando se considera que o solo e suas características são fatores primordiais.

Um das mais importantes famílias de plantas vasculares dentre as espécies lenhosas dos campos rupestres é a Asteraceae, suas espécies são comumente descritas como as mais abundantes e/ou frequentes (e.g., Vincent & Meguro 2008, Ataíde *et al* 2011, Jacobi & Carmo 2011, Messias *et al.* 2012, Carmo & Jacobi 2013). Em uma compilação de listas florísticas realizada por Jacobi & Carmo (2011) foi demonstrado que maioria das espécies dessa família é caracterizada como fanerófito (53.6%), sua dispersão ocorre por anemocoria (85.3%) e a polinização é entomófila (100%). As espécies dessa família *Eremanthus gromerulatus* (DC.) e *Vanillosmopsis erythropappa* (DC.) Sch. Bip. foram descritas como acumuladoras de Cu e Ni no campo rupestre ferruginoso (Teixeira & Lemos-Filho 1998). Em outro estudo Ribeiro *et al.* (2016) sugerem que outras três espécies em áreas com solos ricos em metais podem absorver e acumular Al, Fe e Mn e utilizá-los como compostos de defesa.

O objetivo deste trabalho foi comparar, por meio de um experimento, o efeito da adição de nutrientes na formação de biomassa de folhas e a acumulação de nutrientes em três espécies de Asteraceae: *Trixis vauthieri* DC., *Lychnophora pinaster* Mart. e *Baccharis dracunculifolia* DC.. Baseado na premissa de que a acumulação de nutrientes nas folhas reflete a oferta nutricional do solo e que deve haver uma concentração equilibrada entre macro e micronutrientes (Kuznetsova *et al.* 2011, Sadeghzadeh 2013), testamos as seguintes hipóteses: (i) *Trixis vauthieri*, *Lychnophora pinaster* e *Baccharis dracunculifolia* acumulam maior biomassa nas folhas em resposta à adição de nutrientes no solo; e (ii) o conteúdo foliar de macro e micronutrientes varia de acordo com as condições nutricionais do solo.

Métodos

Área de estudo e Espécies

A coleta foi realizada em cinco locais diferentes no Parque Estadual do Rola Moça, na região do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil (20° 02' 42,3" S, 43 ° 59' 89,3" W – 20 ° 03' 60,3 " S, 044 ° 01' 90,5" W) (Figura 1). A temperatura anual média da região é



entre 18-20 °C e a média de precipitação entre 1300-1900mm, com período de seca entre junho e setembro (Carmo *et al.* 2015). Foram coletados diásporos de três espécies da família Asteraceae: *Trixis vauthieri*, *Lychnophora pinaster* e *Baccharis dracunculifolia*. Essas espécies foram selecionadas com base na ocorrência de frutificação no período de coleta e/ou no alto valor do IVI (Índice de Valor de Importância) em estudos fitossociológicos realizados em campos rupestres ferruginosos (ver Viana & Lombardi de 2007, Jacobi et al. 2007, 2008b, Messias et al. 2012). Para a realização dos experimentos A coleta de solo foi realizada no entorno do parque devido a restrições para uso e extração do solo. O experimento foi realizado entre Junho/2014 e janeiro/2015, em casa de vegetação localizada na Reserva Vellozia (19° 16' 45,7" S, 43° 35' 27,8" W), Minas Gerais, que apresenta condições climáticas similares (veja Madeira & Fernandes 1999).

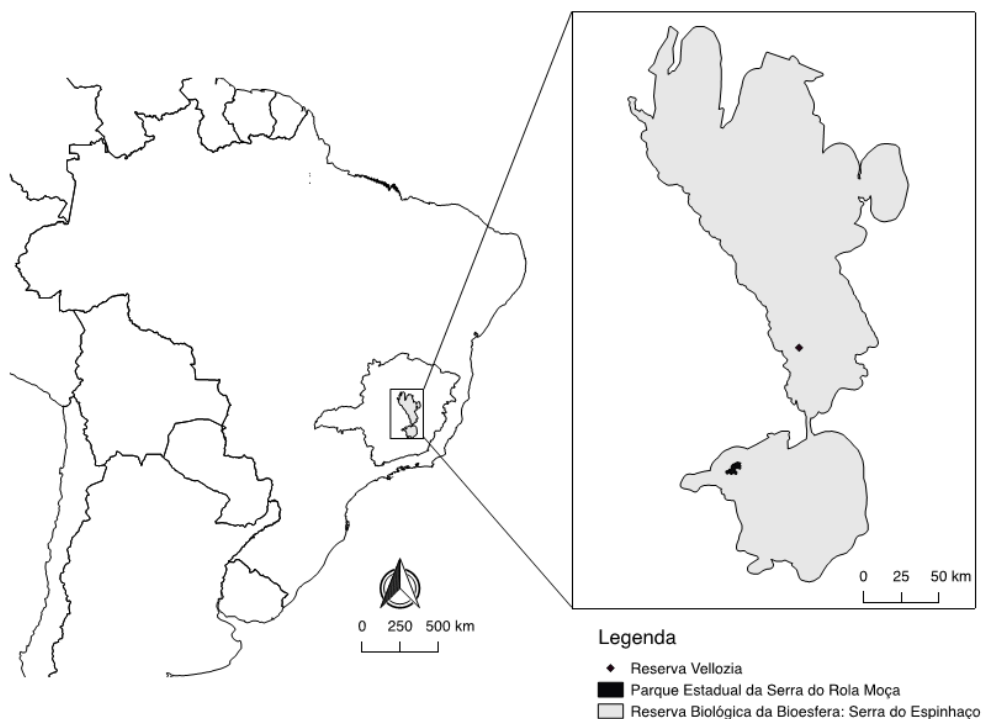


Figura 1: Mapa de localização do Parque Estadual Serra do Rola Moça (local de coleta) e da Reserva Vellozia (local do experimento) localizados dentro da Reserva da Biosfera: Serra do Espinhaço, Brasil.



Experimento

Para realização do teste do efeito da adição de nutrientes foram coletados diásporos maduros de no mínimo 10 diferentes plantas/matriz. Os diásporos foram acondicionados em sacos plásticos identificados, posteriormente, foram triados em laboratório e aqueles que possuíam danos ou parasitas foram descartados. Para obtenção das plantas, as sementes foram plantadas em bandejas de isopor com substrato de vermiculita e foram irrigadas por micro aspersão, durante 10 minutos, duas vezes ao dia. Após 30 dias da germinação, as plantas foram aleatoriamente selecionadas e transferidas para cultivo nos tratamentos em recipientes plásticos (10cm de diâmetro e 100cm de profundidade). Os recipientes foram arranjados em delineamento completamente casualizado (6 tratamentos \times 10 repetições), com um indivíduo por repetição, totalizando 60 indivíduos por espécie. A casa de vegetação era coberta por tela de sombrite (50%), foram irrigadas por micro aspersão, durante 10 minutos, duas vezes ao dia. As plantas foram cultivadas por um período de 150 dias.

Para testar as hipóteses utilizamos seis tratamentos diferentes. Primeiramente todo o solo de campos rupestres ferruginosos foi triado para retirada de fragmentos rochosos maiores que 5 cm, sendo completamente misturado até a sua homogeneização. O tratamento controle foi composto somente pelo solo homogeneizado de campos rupestres ferruginosos. Para outros três tratamentos o solo homogeneizado recebeu a adição de dosagens crescentes de fertilizantes. O tratamento NPK foi composto pela dosagem 1500 g/m³ de NPK (4:14:8) e 2000 g/m³ de calcário dolomítico. Outros dois tratamentos foram compostos por solo de CRF com frações 10 e 100 vezes menores do que a dosagem acima de NPK (chamados NPK/10 e NPK/100, respectivamente) (ver Negreiros *et al.* 2014b). Essa é formulação adequada para ser aplicada no preparo do solo para cultivo de plantas arbóreas e arbustivas, visto que o alto teor de fósforo proporciona formação e desenvolvimento das raízes e das estruturas das plantas (Barros & Stringheta 1999). O tratamento orgânico foi composto por solo de campos rupestres ferruginosos com adubo orgânico produzido por compostagem (Biodeia®) na proporção 2:1. A adubação orgânica altera a estrutura do solo e a capacidade de retenção de água, aumenta a atividade microbiana, modifica a retenção de cátions e ânions, dentre outros benefícios (Wadt 2003). Finalmente, em um outro tratamento utilizou-se substrato de viveiro, composto por partes iguais de terra de subsolo, areia e composto



orgânico (esterco bovino curtido) na proporção 3:2:1, respectivamente. Este tratamento apresenta as características químicas e físicas daqueles normalmente utilizados para a produção de mudas (Negreiros *et al.* 2009). O efeito deste tipo de substrato sobre as respostas das plantas permite avaliar a possibilidade de produzir tais espécies em larga escala, para utilização em restauração ambiental.

Análise nutricional dos solos.

Os solos dos tratamentos foram analisados para descrição de suas características químicas. Para determinar o pH e conteúdo de N, P, K, Fe, Ca, Fe, Zn, Cu e Mg no solo, uma amostra composta de cada tratamento foi enviada para análise pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (segundo protocolo do CFSEMG, 1999) (Tabela 1). Além disso, para determinação da capacidade de retenção de água no solo utilizamos amostras de cada tratamento em teste gravimétrico, como se descreve a seguir. As amostras foram levadas ao laboratório, armazenadas em sacos de papel identificado e colocadas para secagem em estufa a 110 °C por 48 horas. Após esse período foram pesadas em balança analítica e separados em 10 amostras de 100 g. As 10 amostras de cada tratamento foram umedecidas até a saturação, e, após a completa ausência de gotejamento, a porção foi novamente pesada para determinar o conteúdo de água (Novais *et al.* 1991).

Biomassa das folhas e análise do conteúdo nutricional

Para avaliar a biomassa das folhas em resposta aos tratamentos foi realizada coleta destrutiva da planta ao final do estudo. Todas as partes da planta (raiz, caule e folhas) foram separadas. Posteriormente, cada componente coletado foi ensacado individualmente e seco em estufa a 70°C, até ser atingido peso constante, e pesados em balança analítica (precisão de 0,001g). Para determinar o conteúdo de macro e micronutrientes nas folhas cada amostra identificada, por plântula/espécie foi levada para análise de conteúdo de N, P, K, Ca, Fe, Zn, Cu e Mg no Laboratório de Recuperação Ambiental do Departamento de Solos na Universidade Federal de Viçosa, MG, (seguindo as metodologias de Tedesco *et al.* 1995).

Análises Estatísticas

Para verificar as diferenças nas características nutricionais entre os tratamentos foi realizada uma análise de ordenação – Análise de Componentes Principais (PCA) – utilizando uma matriz com características do solo (pH, conteúdo de água, N, P, K, Fe, Ca, Fe, Zn, Cu e



Mg). A PCA é recomendada para verificar correlação entre variáveis abióticas (Legendre & Legendre 1983). Para testar o efeito dos tratamentos sobre a biomassa das folhas e o conteúdo nutricional foliar foram construídos Modelos Lineares Generalizados - GLM. Para cada espécie foram construídos nove modelos em que a variável preditora foi o tratamento, enquanto as variáveis respostas foram: biomassa seca das folhas e o conteúdo de cada nutriente total, razão raiz/ramo, comprimento total, número de folhas, área foliar. Todos os modelos foram construídos utilizando uma distribuição de erros adequada para cada variável resposta, de acordo com a crítica ao modelo e as diferenças médias em cada variável resposta por tratamento foram avaliadas por análise de contraste (Crawley 2013).

Resultados

As características nutricionais dos tratamentos foram diferentes e houve a formação de dois eixos principais (Figura 2). O eixo 1 da PCA (explicou 99.19% da variação dos dados) foi positivamente relacionado com a presença de P, K e Mg, em que estão os tratamentos viveiro e orgânico; e negativamente com Fe e Zn, em que estão os tratamentos controle, NPK/100, NPK/10 e NPK. O eixo 2 (explicou 0.47%) apresenta forte correlação positiva com Zn e Cu e negativa com Ca e Fe, em que estão os tratamentos NPK/100, NPK/10, NPK e controle.

A formação de folhas nas espécies *T. vauthieri* ($F= 164.57$; $p < 0.001$) e *B. dracunculifolia* ($F= 11.296$; $p < 0.001$) foi aumentada em pelo menos 5 vezes frente à adubação orgânica em solo por campo rupestre ferruginoso e duas vezes no tratamento comum de viveiro (Figura 3). A biomassa das folhas de *L. pinaster* ($F= 18.918$; $p < 0.001$) foi 10 vezes maior no tratamento viveiro em relação aos outros tratamentos.

O conteúdo foliar de todos macro (Figura 3) e micronutrientes (Figura 4) da espécie *L. pinaster* variou estatisticamente entre os tratamentos. Essa espécie acumulou mais N ($F= 61.58$; $p < 0.001$) no tratamento viveiro enquanto mais P foi acumulado no tratamento NPK/100 ($F= 17.955$; $p < 0.001$). Em contraste com a menor média de biomassa de folhas no tratamento NPK/10 houve elevado acúmulo (pelo menos duas vezes maior) dos outros nutrientes nas folhas de plantas cultivadas nesse tratamento: K ($F= 20.53$; $p < 0.001$), Ca ($F= 31.312$; $p < 0.001$), Fe ($F= 35.643$; $p < 0.001$), Cu ($F= 85.566$; $p < 0.001$) e Zn ($F= 111.69$; $p <$



0.001). Maiores conteúdos de Mg ($F= 252.65$; $p< 0.001$) foram encontrados nas folhas de plantas cultivadas nos tratamentos viveiro e NPK/10.

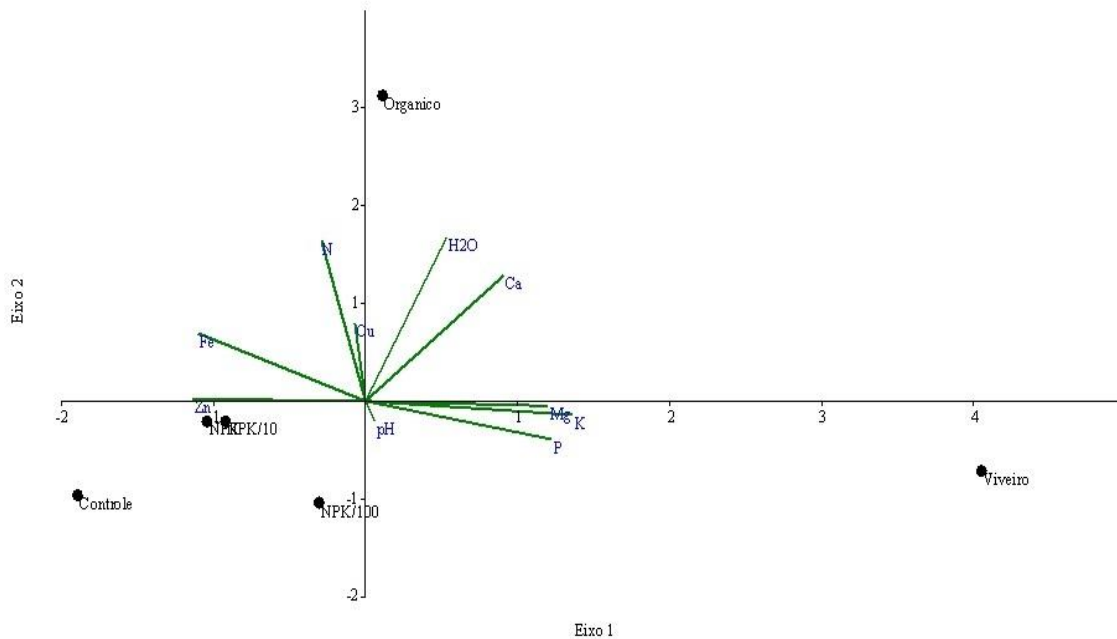


Figura 2: Ordenação dos eixos formados pela variância-covariância entre as características (pH e conteúdo de água, N, P, K, Fe, Ca, Fe, Zn, Cu e Mg) do solo em cada tratamento.

O conteúdo foliar de macro (Figura 3) e micronutrientes (Figura 4) da espécie *T. vauthieri* variou estatisticamente entre os tratamentos, exceto para o conteúdo de Cu ($F=0.713$; $p= 0.60$). A espécie acumulou mais N ($F= 18.713$; $p< 0.001$) nas folhas de plantas cultivadas no tratamento orgânico, mais P ($F= 3.486$; $p< 0.01$) e Zn ($F= 3.939$; $p< 0.001$) nas folhas de plantas cultivadas no tratamento viveiro. Maiores conteúdos de K ($F=44.246$; $p< 0.001$) foram encontrados nas folhas de plantas cultivadas em orgânico e viveiro. O conteúdo foliar de Ca ($F= 19.732$; $p< 0.001$) foi maior nas folhas de plantas cultivadas no tratamento NPK. O conteúdo de Fe ($F= 7.219$; $p< 0.001$) foi maior nas folhas de plantas cultivadas no controle e NPK/100, NPK/10 e NPK. Maior conteúdo de Mg ($F=3.389$; $p< 0.01$) foi nas folhas de plantas cultivadas no tratamento NPK/100.

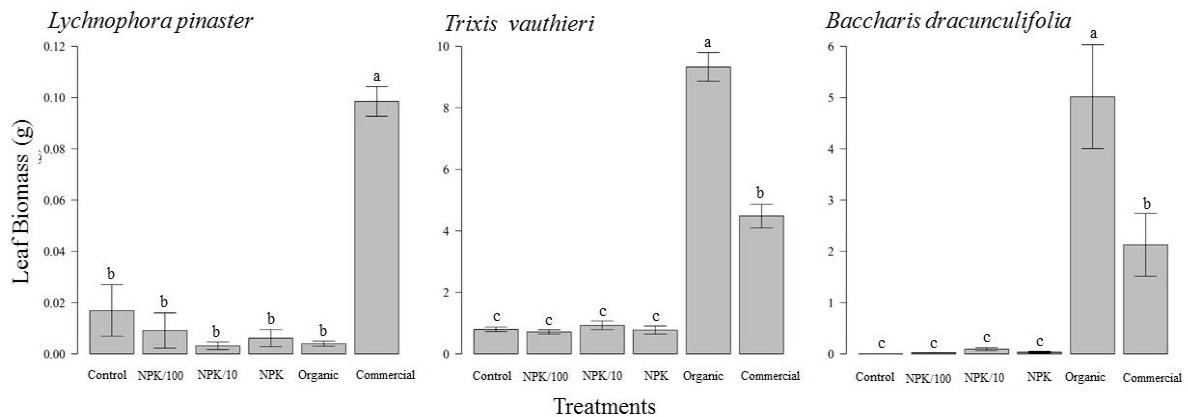


Figura 3: Biomassa de folhas (g) em função dos tratamentos nas espécies *L. pinaster*, *T. vauthieri* e *B. dracunculifolia*, respectivamente. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

O conteúdo foliar de macro (Figura 3) e micronutrientes (Figura 4) da espécie *B. dracunculifolia* variou entre os tratamentos, exceto o K ($F=1.829$; $p= 0.14$). Os maiores conteúdos de N ($F=19.261$; $p< 0.001$) foram nas folhas das plantas cultivadas em tratamento orgânico e viveiro. Os maiores de P ($F=3.389$; $p< 0.001$) foram nas folhas das plantas no orgânico, viveiro e controle. O conteúdo de Ca ($F=15.606$; $p< 0.001$) foi elevado nas folhas das plantas cultivadas em viveiro, orgânico, controle, NPK/100 e NPK/10. O maior conteúdo foliar de Fe ($F=19.261$; $p< 0.01$) foi nas folhas das plantas cultivadas no tratamento controle e o de Zn ($F=2.798$; $p= 0.03$) e Mg ($F=19.261$; $p< 0.01$) no viveiro. Os maiores conteúdos de Cu ($F=19.261$; $p< 0.01$) foram nas folhas das plantas cultivadas no controle, NPK/100 e NPK/10.

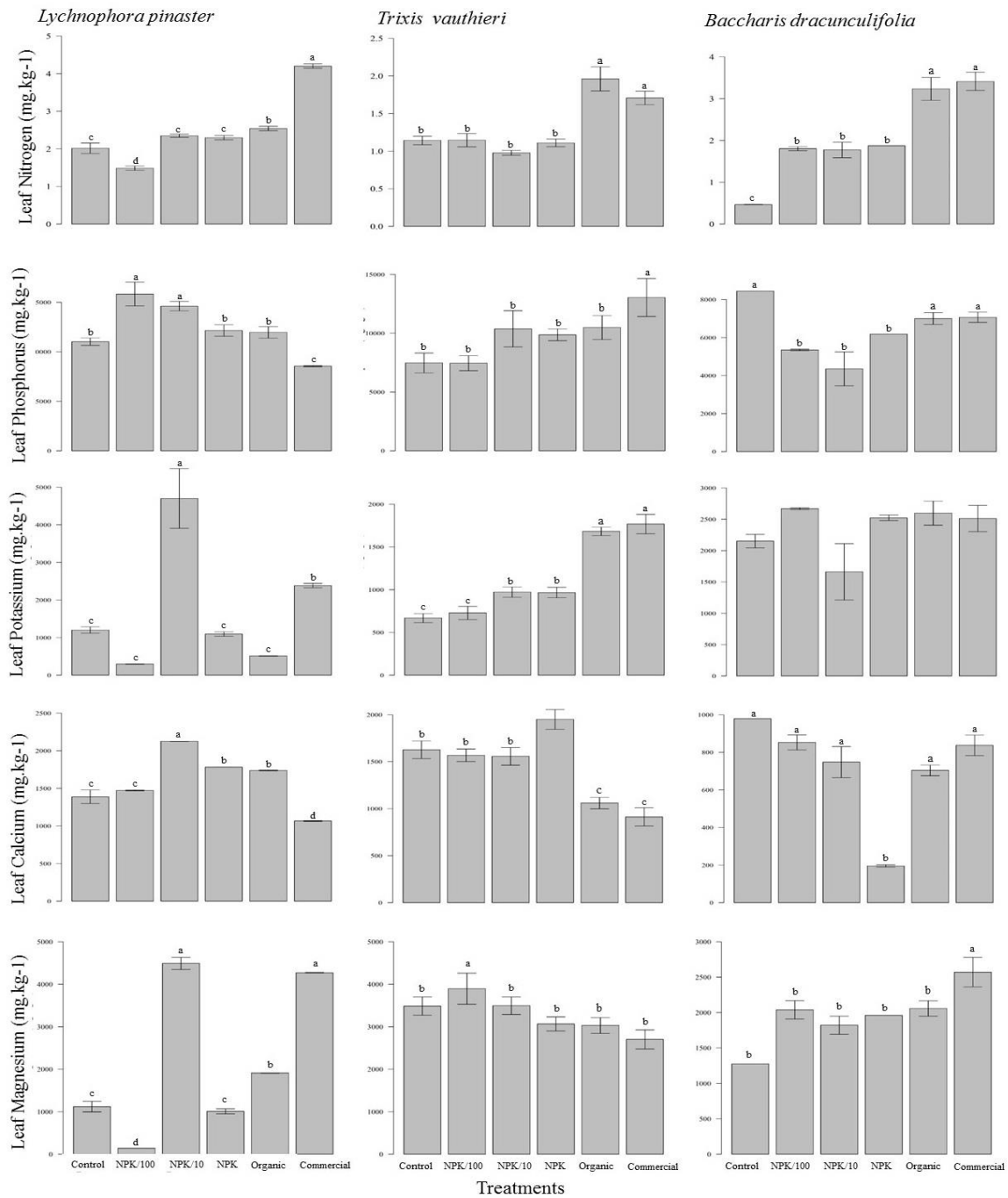


Figura 3: Macronutrientes N, P, K, Ca e Mg em folhas das espécies *L. pinaster*, *T. vauhierii* e *B. dracunculifolia*, respectivamente, em função dos tratamentos. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

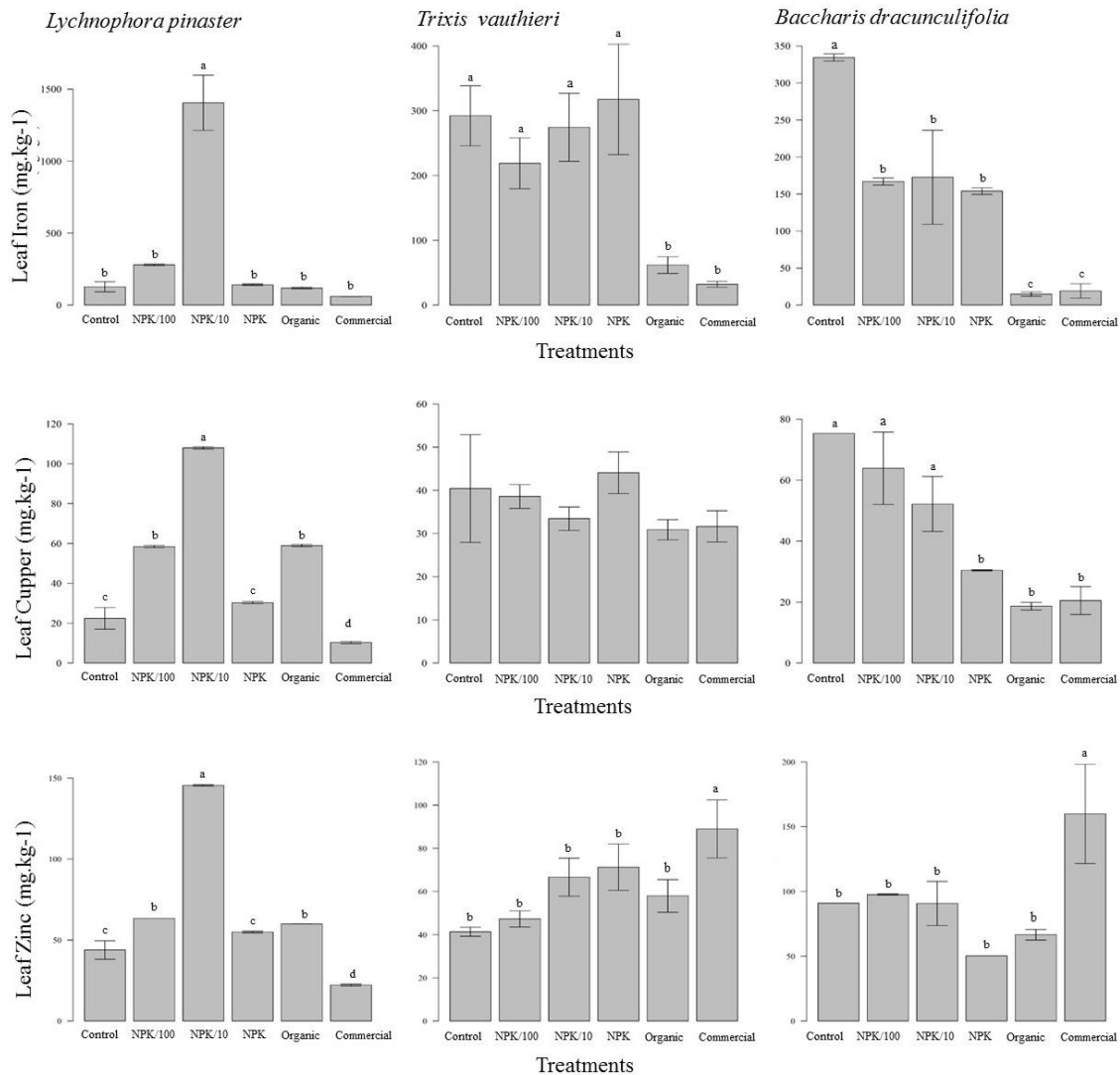


Figura 4: Micronutrientes Fe, Cu e Zn em folhas das espécies *L. pinaster*, *T. vauhierii* e *B. dracunculifolia*, respectivamente, em função dos tratamentos. Barras representam a média e a linha o erro padrão e letras diferentes indicam médias diferentes a 5% de significância.

Discussão

As diferentes características nutricionais dos tratamentos proporcionam ofertas desiguais de nutrientes para as plantas. Somado a isso a mudança de pH e quantidade de água alteram o meio e as interações químicas. A interação e equilíbrio dos nutrientes nos tecidos vegetais são importantes para o crescimento e sobrevivência de plantas sob condições de estresse (Kuznetsova *et al.* 2011). Uma menor quantidade de algum elemento mineral pode



restringir e determinar o crescimento da planta. A absorção dos elementos químicos disponíveis no solo depende não somente de sua concentração, mas também da solubilidade e da capacidade de absorção das raízes (Chapin 1980). Essa capacidade pode ser definida pela preferência específica por algum nutriente ou determinada geneticamente (Antonovics 1975. Bloom *et al.* 1985). A exigência nutricional varia também entre espécies, família, órgão, ontogenia ou estado de desenvolvimento da planta (Larcher 2000).

Em solos com deficiência nutricional ocorre maior liberação de íons H^+ , e esse aumento eleva a capacidade redutora nas células das raízes, e nutrientes como o Fe e outros elementos tornam-se mais disponíveis para a absorção (Larcher 2000). Porém, podem haver plantas capazes de restringir a absorção de nutrientes, mantendo-os em níveis baixos nos tecidos (Kazakou *et al.* 2008). Na ausência de N e P no solo, a planta comumente limita seu crescimento devido ao importante papel desses elementos no controle do crescimento e metabolismo (Chapin 1980). No presente estudo foi encontrada uma relação direta entre a biomassa de folhas e a absorção de N. Plantas adaptadas a solos inférteis apresentam elevada capacidade de difusão de íons móveis, como o K, e menor capacidade para íons imóveis como o Ca, elevando a necessidade de interação com fungos micorrízicos, por exemplo (Aerts & Chapin 2000). Em solos ácidos aumenta a capacidade de absorção de Fe e outros metais potencialmente tóxicos (Larcher 2000).

A espécie *L. pinaster* foi aquela que apresentou a menor quantidade absoluta de biomassa nas folhas, com uma quantidade total menor do que 0,5g. Mesmo com folhas tão pequenas, a biomassa de folhas no tratamento de viveiro foi seis vezes maior e, nesse tratamento, foi absorva maior absorção de N e Mg. O N é um nutriente diretamente relacionado à produção de folhas e o Mg com a composição e ativação de clorofilas (Raven 2001). Nos tratamentos onde o componente básico é o solo de campo rupestre ferruginoso (controle, NPK/100, NPK/10, NPK e Orgânico), mais correlacionados com a presença de Fe a produção de folhas foi bastante reduzida. No tratamento NPK/10, *L. pinaster* demonstrou elevada absorção de Ca, Mg, Fe, Cu e Zn. Em algumas situações as células podem absorver preferencialmente alguns íons, mas quando determinados elementos excedem um limite, a planta não pode excluir os íons desnecessários ou tóxicos (Larcher 2000).



A espécie *T. vauthieri* apresentou maior média de biomassa das folhas no tratamento formado por solo de campos rupestres ferruginosos com adubação orgânica, onde houve também maior acumulação nas folhas dos nutrientes N e K e menor de Fe. Parece haver, para essa espécie, uma relação inversa na acumulação desses minerais, pois, nos tratamentos onde houve menor biomassa de folhas houve maiores valores de conteúdo de Fe. No tratamento viveiro também houve elevada produção de folhas e absorção de P, K e Zn. Mesmo com adição de nutrientes realizada com a adubação química em diferentes níveis (NPK/100, NPK/10 e NPK) não houve aumento da biomassa e da concentração de nutrientes. Parece haver uma relação direta entre as concentrações de nutriente foliar e as concentrações de nutrientes do solo, porém, não é necessariamente linear, depende também de aspectos fisiológicos específicos, fotossíntese e respiração, além da capacidade de absorção pela raiz (Ostertag 2010).

A biomassa média de folhas foi maior de *B. dracunculifolia* no tratamento com substrato de campos rupestres ferruginosos com adubação orgânica, e houve maior quantidade de N e Ca nos tecidos foliares. Houve menor biomassa de folhas substrato de viveiro, mas elevada absorção de N, Ca, Mg e Zn. Essa espécie apresentou baixa formação de folhas no solo de campo rupestre ferruginoso, mesmo com adubação de NPK em três níveis. Essa espécie parece otimizar melhor a absorção dos nutrientes e seu crescimento em diferentes condições nutricionais, visto que não houve variação no conteúdo foliar de K e amplitudes menores na absorção de nutrientes em todos os substratos. A adubação química com NPK/100 e NPK/10 ajudou a espécie a diminuir a alocação de Cu para as folhas, mas isso não serviu para aumentar a biomassa.

As espécies estudadas apresentaram respostas idiossincráticas e altamente variáveis na acumulação de alguns micro e macro nutrientes para as espécies. Em um estudo sobre sobrevivência e alocação de biomassa de espécies de campos rupestres quartzíticos, Negreiros *et al.* (2009) também encontraram um padrão idiossincrático e alta variabilidade fenotípica para duas espécies. Em estudo sobre a acumulação de metais com plantas em área de mineração, Teixeira e Lemos-Filho (1998) encontraram padrão na seletividade de acumulação de Cu e Ni em espécies dessa família. Como o campo rupestre é um mosaico de microambientes com diversos tipos de formações e substratos em um pequeno espaço



(Schaeffer et al. 2016, Silveira *et al.* 2016) as diferentes respostas podem favorecer a diversidade de aspectos funcionais nesse ambiente ao mesmo tempo que seleciona plantas tolerantes ao estresse (Negreiros *et al.* 2014). Planta em ecossistemas onde o solo é severamente empobrecidos apresentam forte convergência funcional em estratégias de nutrição mineral da (Oliveira *et al.* 2014). Wright & Westoby (2003) também encontraram considerável padronização nas concentrações foliares (N e P) em espécies esclerófilas de Asteraceae que ocorrem em locais secos na Austrália.

Estudos sobre valores críticos de conteúdo nutricional foliar para espécies silvestres em ambientes naturais para fins de comparação são raros na literatura. Porém, observando os valores publicados por Larcher (2000) e Raven *et al.* (2001) com valores críticos para plantas terrestres pode-se perceber que as três espécies estudadas possuem menos N foliar do que o valor crítico indicado. Enquanto os valores de conteúdo foliar de P, K, Ca, Mg e Zn encontrados nesse estudo foram próximas ou dentro desse valor crítico. O Fe nos tecidos das folhas de *L. pinaster* foi acima do valor crítico, indicando potencial toxicidade. O conteúdo de Cu encontrado nas folhas das três espécies foi maior do que o valor crítico, esse elemento também pode ser fator de toxicidade para as plantas. Em concentrações elevadas de Cu comumente ocorre necrose foliar, perda de folhas e redução de crescimento, principalmente da raiz (Freitas *et al.* 2015). Normalmente plantas adaptadas a solos inférteis têm elevada capacidade para absorvem íons móveis, tais como K, mas, relativamente menor capacidade para absorver íons de imóveis como fosfato (Aerts & Chapin 2000). Em contrapartida, plantas que crescem em solo rico em nutrientes disponíveis diminuem a absorção de metais pesados (Foy *et al.* 1978).

A formação de folhas nas espécies *Trixis vauthieri*, *Lychnophora pinaster* e *Baccharis dracunculifolia* foi aumentada frente à adubação orgânica em solo de campo rupestre ferruginoso e comum de viveiro. As espécies estudadas apresentaram diferentes conteúdos de macro e micronutrientes nos substratos utilizados. Mas, em geral, houve maior acúmulo de macronutrientes nos tratamentos orgânico e viveiro e maior acúmulo de micronutrientes nos tratamentos em que o solo base é o de campo rupestre ferruginoso, com ou sem adubação química ou orgânica. As respostas encontradas nesse trabalho são



idiossincráticas e não parecem filogeneticamente relacionadas, e apenas estudos a longo prazo e com mais espécies, podem resultar em um entendimento maior que busca padrões.

Referências

- Aerts, R. & Chapin F.S. III. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research* 30: 1-67.
- Alonso C. & Herrera C.M. 2001. Patterns made of patterns: variation and covariation of leaf nutrient concentrations within and between populations of *Prunus mahaleb*. *New Phytologist* 150: 629-640.
- Alves R.J.V., Silva N.G., Oliveira J.A. & Medeiros D. 2014. Circumscribing campo rupestre – megadiverse Brazilian rocky montane savannas. *Brazilian Journal of Biology* 74(2): 355-362.
- Ataíde E.S., Castro P.T.A. & Fernandes G.W. 2011. Florística e caracterização de uma área de campo ferruginoso no complexo minerário alegria, Serra de Antônio Pereira, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. *Revista Árvore* 35: 1265-1275.
- Basta N.T., Ryan J.A. & Chaney R.L. 2005. Trace elements chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of Environmental Quality* 34:49-63
- Carmo F.F. & Jacobi C.M. 2013. A vegetação de canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: caracterização e contexto fitogeográfico. *Rodriguésia* 64: 527-541.
- Carmo F.F., Campos I.C. & Jacobi C.M. 2015. Effects of fine-scale surface heterogeneity on rock outcrop plant community structure. *Journal of Vegetation Science* 27: 50-59.
- Crawley, M. J. 2013. *The R Book*. John Wiley and Sons. 2. Ed. New York.
- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. *Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. 5a Aproximação*, ed. A.C. Ribeiro P.T.G., Guimarães V.A., Alvares V. CFSEMG, Viçosa.
- Freitas T.A., França M.G.C, Almeida A.A.F., Oliveira S.J.R, Jesus R.M., Souza V.L., Silva J.V.S & Mangabeira P.A. 2015. Morphology, ultrastructure and mineral uptake is



- affected by copper toxicity in young plants of *Inga subnuda* subs. *luschnathiana* (Benth.) T.D. Penn. Environmental Science Pollution Research.
- Foy C.D., Chaney R. L. & White M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology 29: 511-566.
- Jacobi C.M., Carmo F.F., Vincent R.C. & Stehman J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. Biodiversity Conservation 16: 2185-2200.
- Jacobi C.M., Carmo F.F. & Vincent R.C. 2008b. Estudo fitossociológico de uma comunidade vegetal sobre canga como subsídio para a reabilitação de áreas mineradas no Quadrilátero Ferrífero, MG. Revista Árvore 32: 345-353.
- Jacobi, C.M. & Carmo, F.F. 2008. The contribution of ironstone outcrops to plant diversity in the Iron Quadrangle, a threatened Brazilian landscape. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 37(4): 324-326.
- Jacobi C.M. & Carmo F.F. 2011. Life-forms, pollination and seed dispersal syndromes in plant communities on ironstone out-crops, SE Brazil. Acta Botanica Brasilica 25: 395-412.
- Jacobi C.M. & Carmo F.F. 2012. Diversidade florística nas cangas do Quadrilátero Ferrífero. IDM, Belo Horizonte.
- Kuznetsova T., Lukjanova A., Mandre M. & Lõhmus K. 2011. Aboveground biomass and nutrient accumulation dynamics in young black alder, silver birch and Scots pine plantations on reclaimed oil shale mining areas in Estonia. Forest Ecology and Management 262: 56-64.
- Larcher W. 2000. Ecofisiologia vegetal. São Carlos: Rima. 531p
- Legendre P. & Legendre L. 1983. Numerical Ecology. 2ed. 870p.
- Messias, M.C.T.B., Leite M.G.P., Meira-Neto J.A.A. & Kozovits A.R. 2012. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Acta Botanica Brasilica 26: 230-242.
- Negreiros D., Fernandes G.W., Silveira F.A.O. & Chalub C. 2009. Seedling growth and biomass allocation of endemic and threatened shrubs of rupestrian fields. Acta Oecologica 35: 301-310.



- Negreiros D., Le Stradic S., Fernandes G.W. & Rennó H.C. 2014a. CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. *Plant Ecology* 215: 379-388.
- Negreiros D., Esteves D., Fernandes G.W., Berbara R.L.L., Oki Y., Vichiato M. & Chalub C. 2014b. Growth-survival tradeoff in widespread tropical shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae) in response to a nutrient gradient. *Tropical Ecology* 55: 167-176.
- Novais R.D., Neves J.C.L., Barros N.D., Oliveira A.D., Garrido W.E., Araujo J.D. & Lourenço S. 1991. Ensaio em ambiente controlado. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: Embrapa-SEA: 189-253.
- Oliveira R.S., Galvão H.C., Campos M.C.R., Eller C.B., Pearse S.J. & Lambers H. 2014. Mineral nutrition of Campos Rupestres plant species on contrasting nutrient-impooverished soil types. *New Phytologist* 205: 1183-1194.
- Ostertag R. 2010. Foliar nitrogen and phosphorus accumulation responses after fertilization: an example from nutrient-limited Hawaiian forests. *Plant Soil* 334: 85-98.
- Raven P.H., Evert R.F. & Eichhorn S.E. 2001. A composição molecular das células vegetais. In: Raven P.H., Evert R. F. & Eichhorn S.E. (orgs). *Biologia Vegetal*. 6ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 17-39.
- Ribeiro S.P., Londe V., Bueno A.P., Barbosa J.S., Corrêa T.L., Soeltl T., Maia M., Pinto V.D., Dueli G.F., Sousa H.C., Kozovits A.R. & Nalini-Jr H.A. 2016. Plant defense against leaf herbivory based on metal accumulation: examples from a tropical high altitude ecosystem. *Plant Species Biology* DOI: 10.1111/1442-1984.12136.
- Ricklefs R.E. & Matthew K.K. 1982. Chemical characteristics of the foliage of some deciduous trees in southeastern Ontario. *Canadian Journal of Botany* 60: 2037-2045.
- Sadeghzadeh B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(4): 905-927.
- Schaefer C.E.G.R., Corrêa G.R., Candido H.G., Arruda D.M., Nunes J.A., Araujo R.W., Rodrigues P.M.S., Fernandes-Filho E.I., Pereira A.F.S., Brandão P.C. & Neri A.V. 2016. The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and



- Interplays *In*: Fernandes G.W. (Ed.) Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil. Springer International Publishing, Switzerland. P: 15-53.
- Silveira F.A.O., Negreiros D., Barbosa N.P.U., Buisson E., Carmo F.F., Carstensen D.W., Conceição A.A., Cornelissen T.G., Echternacht L., Fernandes G.W., Garcia Q.S., Guerra T.J., Jacobi C.M., Lemos-Filho J.P., Le Stradic S., Morellato L.P.C., Neves F.S., Oliveira R.S., Schaefer C.E., Viana P.L. & Lambers H. 2016. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and Soil* 403: 129–152.
- Teixeira W.A. & Lemos-Filho J.P. 1998. Metais pesados em folhas de espécies lenhosas colonizadoras de uma área de mineração de ferro em Itabirito, Minas Gerais. *Revista Árvore* 22: 381-388.
- Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H & Volkweiss, S.J. 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS. 174p. (Boletim Técnico n. 5). 2 ed. rev. amp.
- Thompson K, Parkinson J.A., Band S.R. & Spencer R.E. 1997. A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora. *New Phytologist* 136: 679-689.
- Viana P.L. & Lombardi J.A. 2007. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia* 58:159-177.
- Vincent R.C. & Meguro M. 2008. Plant soil relationships in ferruginous rocky soil vegetation. *Revista Brasileira de Botânica* 31: 377-388.
- Wadt P.G.S. 2003. Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas. Rio Branco, AC: Embrapa Acre. 29p.
- Wright I.J. & Westoby M. 2003. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of Australian sclerophyll species. *Functional Ecology* 17: 10-19.



Adição experimental de nutrientes não reduz a assimetria flutuante em plantas de campos rupestres ferruginosos no Brasil

Thaise de O. Bahia^{9,10}, Tatiana G. Cornelissen¹¹, Geraldo W. Fernandes¹

Resumo

Neste estudo avaliou-se experimentalmente (i) se a assimetria flutuante (AF) funciona como indicador do estresse nutricional em folhas de plantas de campos rupestres ferruginosos, (ii) se o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo reduz a AF, (iii) se AF está positivamente relacionada com dureza das folhas e (iv) se ocorre relação positiva entre AF e nitrogênio foliar. Para testar as hipóteses foram avaliadas quatro espécies: *Baccharis dracunculifolia*, *Trixis vauthieri*, *Copaifera langsdorffii* e *Eriope macrostachya*, que foram cultivadas em cinco tratamentos com diferentes condições nutricionais: controle, três níveis de fertilização química e outro com adubação orgânica. Todas as espécies estudadas apresentaram padrões verdadeiros de AF. O aumento de nutrientes no solo não reduziu a AF, ao contrário, a fertilização aumentou AF para *T. vauthieri* e *E. macrostachya*. Para *B. dracunculifolia* houve diminuição da AF em função da dureza foliar. Não foi encontrada relação entre AF e dureza foliar para *T. vauthieri* e *C. langsdorffii*. Para *T. vauthieri* houve redução da AF e aumento de N foliar. A relação entre AF e N foliar foi oposta entre tratamentos para *E. macrostachya* e *B. dracunculifolia*. Não foi encontrada relação entre AF e conteúdo de N foliar com a para *C. langsdorffii*. A alta frequência de AF nas folhas estudadas reforça a hipótese de que tais espécies estão sob constante estresse nutricional e as diferentes respostas entre espécies refletem seus níveis de tolerância. As adaptações funcionais e morfológicas conferem a essas plantas a habilidade passar pelos fortes filtros ambientais e podem ser determinantes na alta diversidade funcional nesses ambientes.

Palavras-chave: *canga*, estresse, dureza foliar, nitrogênio foliar e plantas metalófitas

⁹ Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade, Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

¹⁰ Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

¹¹ Departamento de Ciências Naturais, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João del Rei, Brasil



Abstract

This study aimed to test experimentally whether (i) the fluctuating asymmetry (FA) of leaves it as a *proxy* of nutritional stress in leaves of ferruginous rupestrian grasslands plants, (ii) an increase in nutrient availability of nutrients in the soil nutrients reduces FA, (iii) there is a positive relationship between FA and leaf toughness and, (iv) there is a positive relation between AF and leaf nitrogen. Four species evaluated: *Baccharis dracunculifolia*, *Trixis vauthieri*, *Copaifera langsdorffii* and *Eriope macrostachya*, which were grown in five substrates differing in nutritional conditions: control, three levels of chemical fertilization and an organic fertilizer. All studied species exhibited true patterns of fluctuating asymmetry. There was no a AF reduction whit increased soil nutrients, rather the FA increased with fertilization in *T. vauthieri* and *E. macrostachya*. In *B. dracunculifolia*, there was a decrease of FA with leaf toughness. The relationship between FA and leaf toughness was opposite between treatments in *E. macrostachya*. No relationship was found between FA and leaf toughness in *T. vauthieri* and *C. langsdorffii*. In *T. vauthieri* there was a reduction of FA and increased leaf nitrogen. The relationship between FA and leaf nitrogen was opposite between treatments in *E. macrostachya* and *B. dracunculifolia*. No relationship was found between FA and leaf nitrogen content in *C. langsdorffii*. The high frequency of FA reinforces the hypothesis that such species are under constant stress and the different responses among it species reflect their tolerance levels. The functional and morphological adaptations grant to such plants the ability to pass the strong environmental filters and can be decisive in high functional diversity in these environments.

Key-words: *canga*, stress, leaf toughness, leaf nitrogen and metalliferous plants

Introdução

O estresse em plantas pode ser causado por diversas condições bióticas e abióticas (Antonovics 1975; Parsons 1990; Rhodes 2001; Beasley *et al.* 2013; Figueiredo *et al.* 2016). Os fatores abióticos causadores de estresse em plantas - como a deficiência hídrica e nutricional - podem interagir entre si e com outras características ambientais para determinar o fenótipo de plantas. Um solo pobre em recursos nutricionais limita processos fisiológicos e de desenvolvimento (Chapin III 1980). O estresse pode refletir diretamente na dificuldade



de expressão de um determinado genótipo, em alterações na expressão do fenótipo e ainda interferir no desenvolvimento normal de algumas estruturas dos organismos (Møller & Swaddle 1997). Por consequência do estresse pode ocorrer redução na *performance* de plantas ou ocorrência de adaptações que incluem crescimento lento, a baixa razão fotossintética, a baixa capacidade de absorção de nutrientes e mudanças no equilíbrio hormonal (Chapin III 1991). Em solos onde ocorre limitação de recursos nutricionais, as plantas precisam otimizar a alocação entre desenvolvimento e processos além de se ajustar fisiologicamente a curto prazo (aclimatação) e a longo prazo (geneticamente) (Bloom *et al.* 1985).

No Brasil, um dos ambientes com características adversas e limitantes é o campo rupestre ferruginoso, um tipo de fitofisionomia associada com vegetações abertas em afloramento rochoso formado há milhões de anos pelo intemperismo de rochas ferríferas e posterior enriquecimento de ferro (Viana & Lombardi 2007; Jacobi & Carmo 2012; Schaefer *et al.* 2016). Os campos rupestres ferruginosos são uma unidade fitogeográfica disjunta localizadas acima de 900m do nível do mar e com alta diversidade de substratos, clima, e ricos em espécies raras e endêmicas, com elevada diversidade *beta* (Jacobi *et al.* 2008a; Giulietti *et al.* 2009; Alves *et al.* 2014, Carmo *et al.* 2015a, Schaefer *et al.* 2016). Os solos associados ao campo rupestre ferruginoso apresentam além de altos teores de alumínio, ferro e metais pesados, forte acidez, são rasos, arenosos e com extrema deficiência nutricional (Vincent & Meguro 2008; Messias *et al.* 2013). Por esse motivo, as espécies que o colonizam são metalófitas com muitas adaptações morfológicas, anatômicas, fisiológicas e reprodutivas para sobreviver nesse ambiente (Teixeira & Lemos-Filho 1998, Viana & Lombardi 2007, Messias *et al.* 2013, Carmo *et al.* 2015b).

Altas concentrações de metais pesados são potencialmente tóxicas para as plantas e podem representar um estresse adicional (Kazakou *et al.* 2008). Antonovics (1975) descreve que a tolerância a metais pesados varia em função da concentração, da sensibilidade da espécie, de forma que a razão de tolerância pode ser efeito da seleção por genótipos tolerantes ao longo do tempo. Algumas plantas são capazes de restringir o transporte e absorção de metais para a parte aérea, mantendo relativamente baixo nível de metais pesados em seus tecidos (Kazakou *et al.* 2008). Outras plantas apresentam a capacidade de tolerar e



metabolizar íons potencialmente tóxicos e podem ser utilizadas para descontaminação de metais e reabilitação do solo degradados (Figueiredo *et al.* 2016). Em um trabalho recente, Ribeiro *et al.* (2016) demonstraram que plantas adaptadas a solos ferruginosos e ricos em metais como manganês e ferro (e.g., *Eremanthus erythropappus*, *Eremanthus incanus*, *Lychnophora ericoides* e *Byrsonima variabilis*) desenvolvem adaptações como a esclerofilia foliar e a capacidade de sequestro de metais e utilização como defesas anti-herbivoria.

Normalmente, assume-se que organismos que se desenvolvem sob condições de estresse ambiental e/ou genético possuem menor capacidade de corrigir pequenos erros no desenvolvimento, que podem ser expressos na forma de assimetria. A medida de assimetria flutuante (AF) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar as instabilidades do desenvolvimento em plantas e animais e representa pequenas variações aleatórias na simetria bilateral de caracteres morfológicos (Palmer & Strobeck 2003). Estudos recentes têm demonstrado que quanto maior o nível de estresse, maior é o desvio no padrão de assimetria bilateral dos organismos (Palmer & Strobeck 2003, revisão em Beasley *et al.* 2013). A medida de AF de folhas, por exemplo, pode ser utilizada em estudos em condições experimentais e em campo (e.g., Parsons 1990, Roy e Stanton 1999, Cornelissen & Stiling 2005, Telhado *et al.* 2016). Estudos com espécies de plantas tropicais e temperadas têm demonstrado que, sob estresse elas apresentam maior assimetria e também maiores níveis de nitrogênio solúvel em suas folhas (Moller 1995, Cornelissen & Stiling 2005), especialmente devido à incapacidade de sintetizar proteínas e/ou compostos secundários. Tanto a nível individual, populacional ou mesmo das comunidades vegetais, a AF tem sido verificada como um estimador confiável para demonstrar a presença e níveis de estresse ambiental e também genético (Cornelissen & Stiling 2011).

Neste estudo avaliou-se experimentalmente se a AF funciona como *proxi* do estresse nutricional ao qual as plantas crescendo em solos pobres nutricionalmente de campos rupestres ferruginosos estão expostas. Avaliou-se também o efeito do aumento experimental de nutrientes na assimetria flutuante das folhas de quatro espécies. Foram testadas as seguintes hipóteses: (i) a AF funciona como previsor do estresse ambiental em plantas de campo rupestre ferruginoso e medidas de assimetria podem ser detectadas em espécies associadas a este ambiente, ii) se a AF é um indicador de estresse ambiental, o aumento de



nutrientes causado por adição experimental de fertilizantes deve reduzir a AF dessas plantas, (iii) por ser um indicativo de estresse ambiental, espera-se uma relação positiva entre AF e dureza de folhas de plantas de campo rupestre ferruginoso e a adição de nutrientes experimentalmente deve reduzir a dureza e a AF (iv) há maior assimetria flutuante em folhas que possuem maior conteúdo de nitrogênio foliar, assim, é esperado que quanto maior o conteúdo de N acumulado na folha, maior a AF das espécies de campo rupestre ferruginoso estudadas.

Métodos

Área de estudo

A coleta de diásporos para o experimento foi realizada em cinco locais diferentes no Parque Estadual do Rola Moça, na região do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil, entre as coordenadas (20° 02' 42,3" S, 43 ° 59' 89,3" W – 20 ° 03' 60,3 " S, 044 ° 01' 90,5" W). A temperatura anual média da região está entre 18-20 °C e a média de precipitação entre 1300-1900mm, com período de seca entre junho e setembro (Carmo *et al.* 2015a). A coleta de solo para o experimento foi realizada no entorno do parque devido a restrições para uso e extração do solo. O experimento foi realizado entre Junho/2014 e janeiro/2015, em casa de vegetação localizada na Reserva Vellozia (19° 16' 45,7" S, 43° 35' 27,8" W), Minas Gerais.

Espécies estudadas

Foram coletados para o experimento diásporos maduros de no mínimo 10 diferentes plantas-mãe das quatro espécies estudadas. Foram quatro espécies pertencentes a três famílias. Essas espécies foram selecionadas com base na ocorrência de frutificação no período de coleta e/ou no alto valor do IVI (Índice de Valor de Importância) em estudos fitossociológicos realizados nos campos rupestres ferruginosos dessa região (ver Viana & Lombardi de 2007, Jacobi et al. 2007, Jacobi et al. 2008b, Messias et al. 2012). As espécies estudadas (Figura 2) foram 1- *Trixis vauthieri* DC. (Asteraceae): com folhas simples, alternas, com bordas inteiras, ramos alados e face abaxial vilosa (Judd *et al.* 2009); 2- *Eriope macrostachya* Mart. ex Benth. (Lamiaceae), que apresenta folhas simples, sésseis, elípticas e coriáceas (Judd *et al.* 2009); 3- *Baccharis dracunculifolia* DC. (Asteraceae): possui folhas simples, forma lanceolada, alternas, com bordas serrilhadas (Judd *et al.* 2009) e 4- *Copaifera*



langsdorffii Desf. (Fabaceae): as folhas são compostas, alternas e paripinadas (Judd *et al.* 2009).

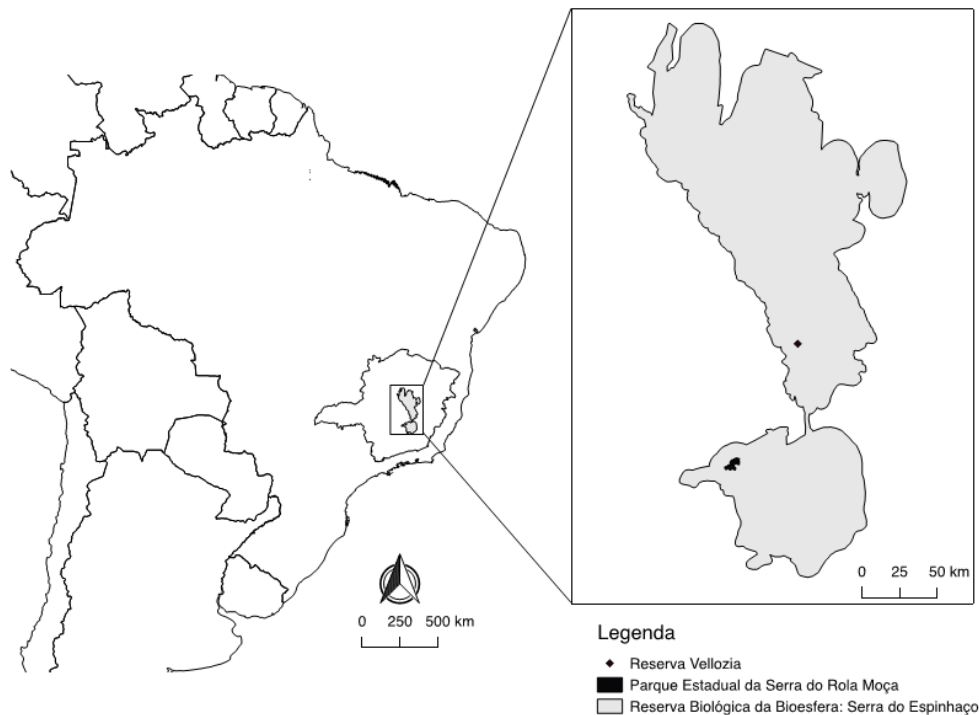


Figura 1: Mapa de localização do Parque Estadual Serra do Rola Moça (local de coleta) e da Reserva Vellozia (local do experimento), Brasil.

Aumento Experimental de nutrientes em plantas de campo rupestre ferruginoso

Os diásporos coletados foram acondicionados em sacos plásticos identificados, posteriormente triados em laboratório e aqueles que possuíam danos ou parasitas foram descartados. Para obtenção das mudas, os diásporos foram semeados em bandejas de isopor com substrato de vermiculita. Após 30 dias da germinação, as plantas foram aleatoriamente transferidas para cultivo nos tratamentos em recipientes plásticos (10 cm de diâmetro e 100 cm de profundidade). Os recipientes foram arranjados em delineamento completamente casualizado (5 tratamentos \times 10 repetições), com um indivíduo por repetição, totalizando 50 indivíduos por espécie. A casa de vegetação era coberta por tela de sombrite (50%), e as mudas foram irrigadas por micro aspersão, durante 10 minutos, duas vezes ao dia. As plantas

foram cultivadas por um período de 150 dias para a coleta das folhas e realização das medidas.

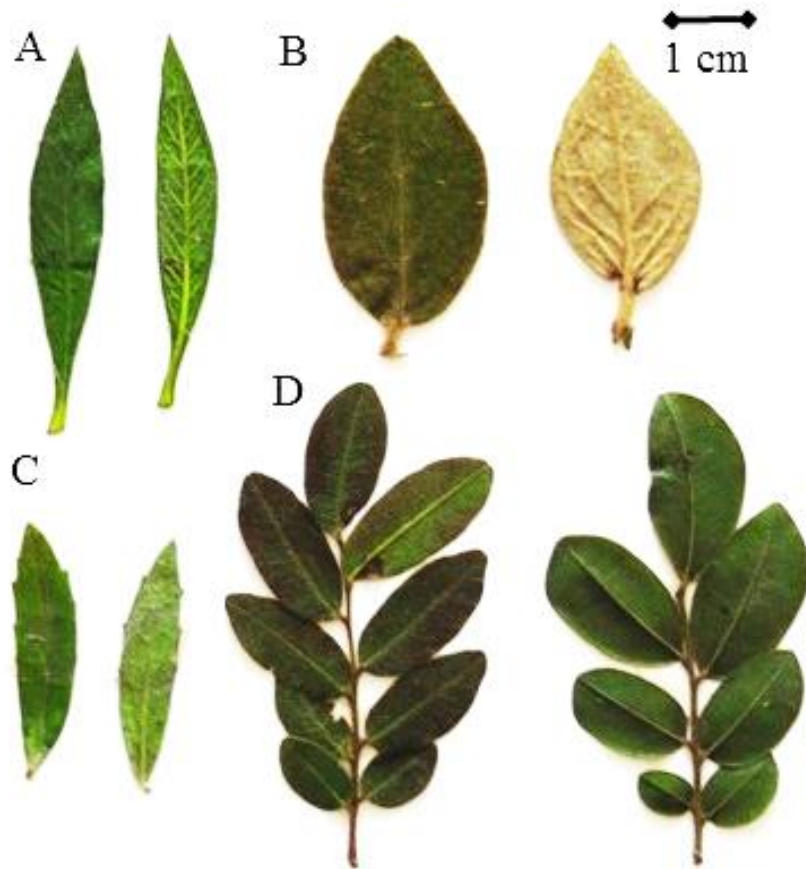


Figura 2: Face adaxial e abaxial das folhas das espécies estudadas: A – *T. vauthieri*; B – *E. macrostachya*; C – *B. dracunculifolia*; D – *C. langsdorffii*.

Foram utilizados cinco tratamentos com diferentes condições nutricionais para testar o efeito da condição nutricional na assimetria flutuante as folhas e em características nutricionais e morfológicas. Primeiramente, todo o solo de campo rupestre ferruginoso foi triado manualmente para retirada de fragmentos rochosos maiores que 5 cm, sendo completamente misturado até a sua homogeneização. O tratamento controle foi composto somente pelo solo homogeneizado de campo rupestre ferruginoso. Para outros tratamentos utilizados, o solo homogeneizado recebeu a adição de dosagens crescentes (três níveis) de fertilizantes. Um dos tratamentos foi composto pela dosagem 1500 g/m³ de NPK (4:14:8)



(Vitaplan®) e 2000 g/m³ de calcário dolomítico, chamado de NPK. Outros dois tratamentos foram compostos por solo de CRF com frações 10 e 100 vezes menores do que a dosagem acima de NPK e calcário dolomítico (chamados NPK/10 e NPK/100, respectivamente) (ver Negreiros *et al.* 2014a). Outro tratamento foi composto por solo de CRF com adubo orgânico (na proporção 2:1) produzido por compostagem de lixo da marca Biodeia®. A fertilização foi realizada somente no momento de preparo dos tratamentos, não havendo fertilização adicional.

Para determinar o pH e conteúdo de Fe, N, P e K uma amostra composta de cada tratamento foi enviada para análise pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (segundo protocolo do CFSEMG, 1999). As características nutricionais dos tratamentos estão detalhadas na Tabela 1. Com base nessas características foi assumido que o aumento experimental de nutrientes em ordem crescente nos tratamentos 1- controle; 2- NPK/100; 3- NPK/10; 4- NPK; e 5- Orgânico, sendo este último o mais nutritivo por apresentar maiores quantidades dos macronutrientes N, P e K.

Assimetria Flutuante de Folhas

Para determinar as medidas da largura dos lados da folha (direito e esquerdo) a partir da nervura central, além da área foliar e da dureza, foram utilizadas 3 folhas intactas e completamente expandidas mais próximas da base do caule de cada planta. Para medir a largura dos lados (mm) a partir da nervura central e a área da folha (mm²) as folhas foram digitalizadas (total= 150 folhas/espécie) utilizando um scanner e, posteriormente medidas utilizando o programa Sigma Scan Pro®. A dureza das folhas foi aferida nas folhas frescas utilizando um penetômetro (Chatillon modelo DFE-010, Largo, Flórida, EUA) acoplado a uma ponta em forma de cone (modelo SPK-FMG-009A). Essas medidas podem indicar variações em fatores alométricos dessas espécies e suas estratégias evolutivas (Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013). Para determinar o conteúdo de nitrogênio foliar as amostras de tecido foram avaliadas no Laboratório de Recuperação Ambiental do Departamento de Solos na Universidade Federal de Viçosa, MG (seguindo a metodologia de Mendonça & Matos 2005).



Tabela 1: Análise do conteúdo de Fe (mg/Kg), N (mg/Kg), P (mg/Kg), K (mg/Kg) e acidez de cada tratamento utilizado no experimento.

Tratamentos	pH	Fe (mg/Kg)	N (mg/Kg)	P (mg/Kg)	K (mg/Kg)
Controle	5.62	28.8	2.49	3.46	7.39
NPK/100	6.21	35.1	1.66	2.05	14.2
NPK/10	6.28	27.6	1.19	15.6	151.1
NPK	7.19	23.6	1.58	30.3	106.5
Orgânico	6.19	30.6	4.88	281.6	185.3

Para determinar os padrões de AF por indivíduo/espécie foram utilizadas as medidas da largura dos lados direito e esquerdo da folha e a área foliar. Para verificar a presença de padrões verdadeiros de AF, foram inicialmente plotados histogramas da diferença absoluta da largura dos lados direito menos esquerdo das folhas de cada espécie. Espera-se distribuição normal de tais valores (Palmer & Strobeck 1986), demonstrando, desvios aleatórios do fenótipo de simetria bilateral e excluindo-se assim assimetria direcional e anti-simetria. Posteriormente, utilizando os mesmos valores de diferença foram realizados testes t de normalidade para uma amostra, que devem apresentar um valor médio que não se desvia significativamente de zero e realizou-se teste de correlação para descartar a relação direta entre a AF e área foliar.

Como medida de assimetria flutuante, o módulo da diferença na largura entre o lado esquerdo e direito de cada folha foi usado para o cálculo do Índice 1 de AF, que é considerado o mais simples e intuitivo (Roy & Stanton 1999):

$$FA = \frac{\sum |RW - LW|}{N}$$

onde RW e LW são as larguras dos lados direito e esquerdo da folha e N o número total de folhas medidas. Em nosso estudo, foram usadas 3 folhas para cada planta por tratamento por espécie. A quantidade de folhas por espécie/tratamento pode variar de acordo com a quantidade de planta de cada espécie que sobreviveram após 150 dias de experimento. Foi calculada para cada espécie o nível de AF por tratamento, além da frequência de ocorrência



de folhas assimétricas, como a razão entre a ocorrência de valores diferentes de zero (direito – esquerdo) em relação ao total de folhas amostradas.

Análise dos Dados

Para descartar erros de medida que podem ser confundidos com AF (Palmer & Strobeck 1986), foi realizado uma reavaliação das medidas de largura dos lados das folhas três meses após a medida inicial. Para isso, foi utilizada uma sub-amostra de 30% das folhas de cada espécie e estas foram novamente medidas, às cegas em relação ao primeiro conjunto de medidas. Determinou-se o Índice de Repetibilidade (Falconer 1981) correlacionando-se as duas medidas das amostras tomadas em cada espécie de planta de campo rupestre ferruginoso. A avaliação de possíveis erros de medidas é considerada importante para verificar se de fato há um verdadeiro padrão de assimetria em organismos (Palmer 1996) e para descartar outros tipos de instabilidade de desenvolvimento como a assimetria direcional e a antissimetria.

Para testar a hipótese da redução de AF com o aumento de nutrientes no solo foram construídos quatro modelos lineares generalizados (GLM). Esses modelos foram construídos por espécie de planta de campo rupestre ferruginoso e a variável resposta foi o índice de AF por planta e a variável preditora foi o tratamento. Para testar se havia influência da fertilização na AF em relação com a dureza de folhas entre tratamentos foram construídos quatro modelos lineares generalizados (GLM) onde a variável resposta foi o índice de AF por planta e a variável preditora foi a dureza com interação com o tratamento. Para testar se havia relação entre a AF e o conteúdo foliar de nitrogênio com o aumento de nutrientes no solo para cada espécie foram construídos outros quatro modelos lineares generalizados. Nesses modelos a variável resposta foi o índice de AF por planta e a variável preditora foi o conteúdo foliar de nitrogênio com interação com o tratamento. Todos os modelos foram construídos utilizando uma distribuição de erros adequada para cada variável resposta, de acordo com a crítica ao modelo através da análise residual (Crawley 2013). Foi construído sempre que possível o modelo mínimo, mais parcimonioso, e as diferenças médias na AF por tratamento foram avaliadas por análise de contraste (Crawley 2013).



Resultados

Todas as espécies de campo rupestre ferruginoso estudadas apresentaram padrões de assimetria direcional, como demonstrado pela distribuição normal de valores de RW-LW e por valores médios de AF que desviaram significativamente de zero (*B. dracunculifolia* $t=2.234$, $P=0.02$; *T. vauthieri* $t=2.165$, $P=0.02$; *C. langsdorffii* $t=2.833$, $P=0.005$ e *E. macrostachya* $t=5.008$, $P<0.001$). Observou-se alta frequência de ocorrência de folhas assimétricas nas espécies estudadas: *T. vauthieri* apresentou 95%, de folhas com desvio de simetria *B. dracunculifolia* 96%, e valores de 97% nas espécies *E. macrostachya* e *C. langsdorffii*. Altos valores de repetibilidade do índice de Falconer (*B. dracunculifolia* 0.912, $P<0.001$; *T. vauthieri* 0.941, $P<0.001$; *C. langsdorffii* 0.932, $P<0.001$ e *E. macrostachya* 0.885, $P<0.001$) indicam a robustez das medidas de AF e descartam erros de medida de simetria.

O aumento dos nutrientes do solo não reduziu a assimetria flutuante em folhas das espécies estudadas (Figura 3). Ao contrário do esperado, houve um aumento de AF com o aumento de nutrientes para as espécies *T. vauthieri* ($F=5.141$, $p<0.001$) e *E. macrostachya* ($F=3.783$, $p<0.01$) no tratamento orgânico, considerado o mais rico nutricionalmente. Nesse tratamento, a AF média foi o dobro daquela encontrada nos outros tratamentos de adição de nutrientes. As espécies *B. dracunculifolia* ($F=0.325$, $p=0.85$) e *C. langsdorffii* ($F=1.697$, $p=0.54$) não sofreram nenhuma influência do aumento dos nutrientes na AF de suas folhas.

Não foi encontrada relação entre AF e conteúdo de nitrogênio nas folhas com a fertilização do solo para a espécie *C. langsdorffii* ($F=0.7193$, $p=0.68$) (Figura 5). No entanto, ao contrário do que era esperado, para *T. vauthieri* ($F=1.3106$, $p=0.26$) houve redução da AF e aumento do nitrogênio foliar com a fertilização de forma que quanto maior a quantidade de N foliar, menor a assimetria. Esse efeito foi significativamente maior no tratamento orgânico que possui folhas mais assimétricas (Figura 5). Um padrão contrário entre tratamentos foi encontrado para as espécies *E. macrostachya* ($F=2.6899$, $p=0.02$) e *B. dracunculifolia* ($F=2.7914$, $p=0.03$). A espécie *E. macrostachya* apresentou relação positiva entre AF e N foliar no controle e tratamentos enriquecidos com diferentes níveis de NPK; e no tratamento orgânico, mais nutritivo, houve relação negativa entre a AF e N foliar. A espécie *B. dracunculifolia* apresentou menor AF com o aumento do N foliar no controle, NPK/10 e

NPK. Nos tratamentos orgânico e NPK/10 o aumento de N foliar levou a um aumento significativo de AF (Figura 5).

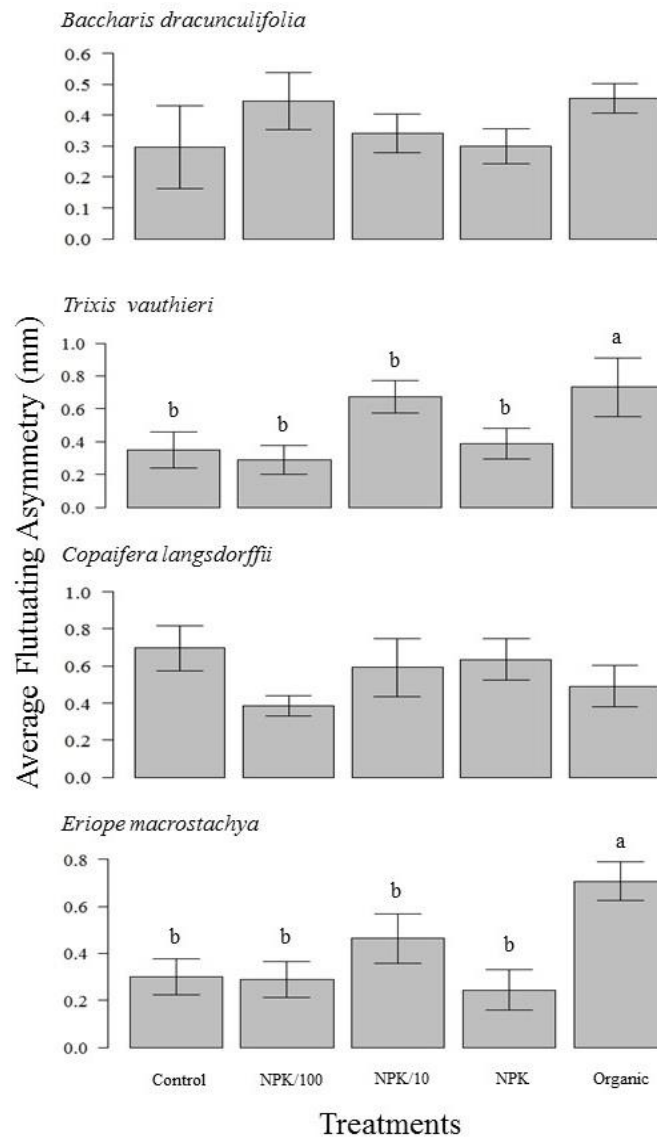


Figura 3: Médias de assimetria flutuante (mm) das folhas de plantas de espécies de campo rupestre ferruginoso em função do aumento de nutrientes no solo. Letras diferentes demonstram médias estatisticamente diferentes a 5% de significância.

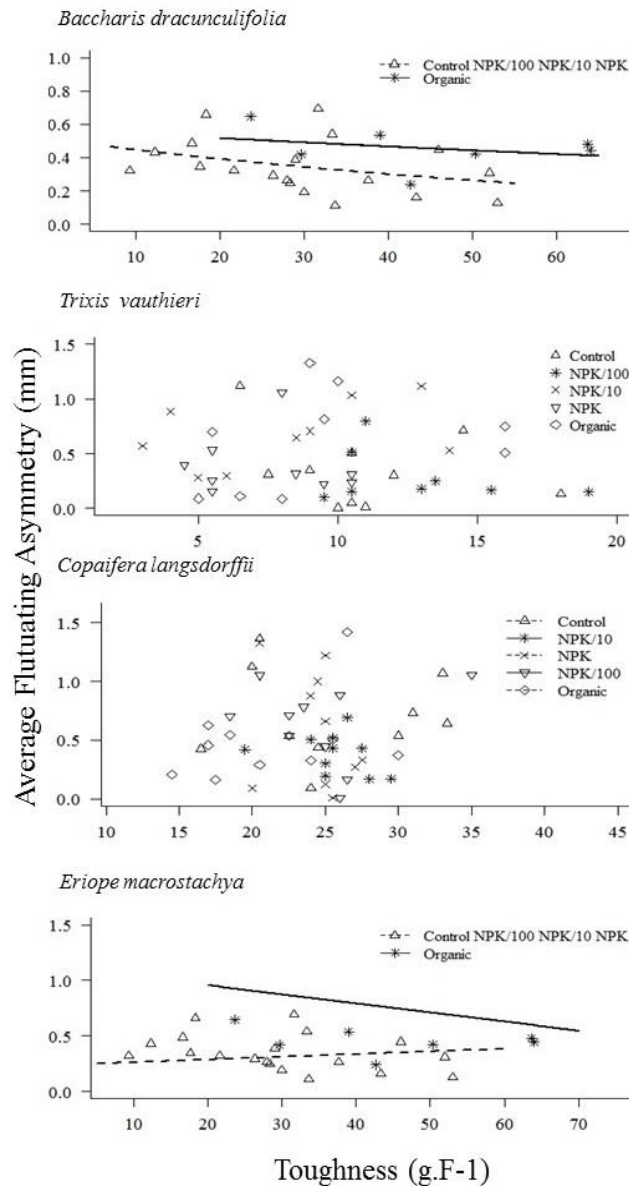


Figura 4: Relação entre dureza foliar (g.F-1) e assimetria flutuante (mm) das folhas de plantas de espécies de campo rupestre ferruginoso em função do aumento de nutrientes no solo.

Não foi encontrada relação entre AF e a dureza foliar com a fertilização do solo para as espécies *T. vauthieri* ($F= 1.3106$, $p=0.26$) e *C. langsdorffii* ($F= 0.749$, $p= 0.66$) (Figura 4). Entretanto, para *B. dracunculifolia* ($F=11.429$, $p<0.001$) houve diminuição da AF em função dureza foliar com o aumento de nutrientes, ao contrário do esperado, e esse efeito variou entre tratamentos. No tratamento orgânico, considerado o mais rico nutricionalmente, as

folhas eram ainda mais assimétricas e mais duras (Figura 4). A relação entre AF e dureza foliar em *E. macrostachya* ($F= 2.2411$, $p<0.04$) foi diferente entre tratamentos. Enquanto no tratamento controle e nos enriquecidos com diferentes níveis de NPK observou-se o aumento da dureza e dos níveis de assimetria, No tratamento orgânico com mais nutrientes houve diminuição assimetria com o aumento da dureza foliar.

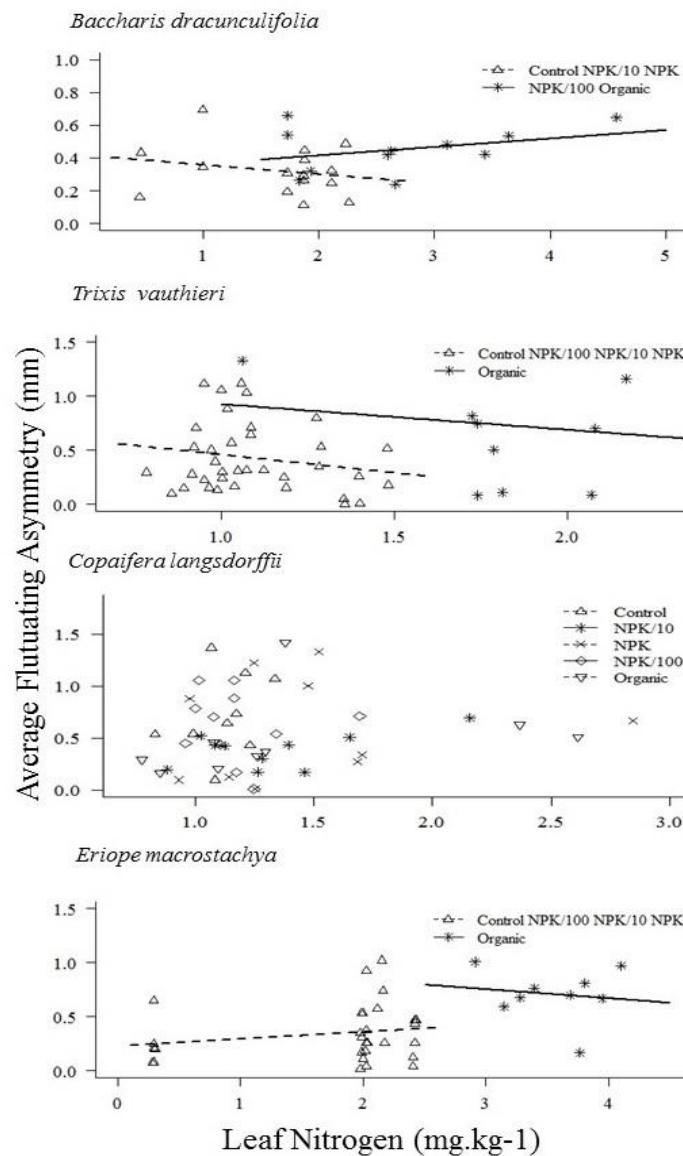


Figura 4: Relação entre conteúdo de N foliar (dag.kg-1) e média de assimetria flutuante (mm) das folhas de plantas de espécies de campos rupestres ferruginosos em função do aumento de nutrientes no solo.



Discussão

Foram observados padrões de AF para as espécies de campos rupestres ferruginosos estudadas, indicando que tais espécies respondem a características abióticas desse ambiente com alterações morfológicas na simetria bilateral de suas folhas. De fato, diversos estudos têm demonstrado a eficácia da AF como medida de estresse ambiental, mas esse é o primeiro estudo experimental revelando o uso dessa ferramenta para plantas em campo rupestre ferruginoso do estado de Minas Gerais, áreas sob estresse nutricional e hídrico. A AF foi considerada um indicador de tensão ambiental para quatro espécies de Melastomataceae no campo rupestre quartzítico, que exibiram verdadeiros padrões de assimetria em alguns caracteres de folhas e as flores (Telhado *et al.* 2016). Em uma revisão meta-analítica recente, Beasley *et al.* (2013) demonstraram que a assimetria flutuante funciona como um previsor confiável de estresse ambiental, sendo mais evidente em casos de estresse de origem antropogênica, demonstrando a eficiência de tal ferramenta também no monitoramento ambiental.

Em solos de campos rupestres ferruginosos são encontrados altos teores de metais pesados, menor conteúdo de matéria orgânica, água e muitas das espécies desse ambiente são capazes de acumular metais (Messias *et al.* 2013). Os altos custos de acúmulo de metais pesados e processos fisiológicos associados à tolerância (Antonovics 1975) podem ser responsáveis pela instabilidade no desenvolvimento, expressas na forma de assimetria flutuante em plantas associadas aos campos rupestres ferruginosos. Ribeiro *et al.* (2016) demonstraram ainda que espécies de plantas comuns em campos rupestres ferruginosos de fato acumulam metais pesados em suas folhas e estes influenciam nas taxas de crescimento, *performance* e níveis de herbivoria.

A alta frequência de folhas assimétricas encontradas, chegando a quase 100% das folhas amostradas em algumas espécies, reforçam a hipótese de que tais plantas estão sob constante estresse. Diversas adaptações funcionais e morfológicas conferem às plantas a habilidade de sobreviver nesse ambiente. Diferentes graus de resposta entre espécies refletem suas adaptações, que podem ser programadas por meio de seleção genotípica (Antonovics *et al.* 1967). Um estudo realizado com plantas de campos rupestres quartzíticos – solo pobre, ácido, rico em alumínio – demonstrou que os fortes filtros ambientais selecionam plantas



tolerantes ao estresse e podem ser determinantes na alta diversidade funcional nesses ambientes (Negreiros *et al.* 2014b). Segundo Ambo-Rappe *et al.* (2008) a seleção de genótipo tolerante também pode influenciar a resistência da espécie *Halophila ovalis* à poluição ambiental por metais pesados, visto que, para essa espécie não houve aumento da AF em função da poluição. Outros estudos têm demonstrado que a salinidade (Cornelissen & Stiling 2011), a poluição (Guimarães *et al.* 2012, Mendes & Cornelissen 2016) e outros fatores abióticos também levam a aumento da AF em estruturas modulares como folhas e flores.

A fertilização do solo não influenciou na diminuição dos níveis de AF nas espécies de campo rupestre ferruginoso estudadas. Houve ainda um aumento da AF com adição de nutrientes no solo (tratamento orgânico) para *E. macrostachya* e *T. vauthieri*. Em um estudo com *Ulmus glabra* (Ulmaceae), Møller (1995) sugere que a fertilização também pode funcionar como estresse ambiental, levando a aumentos de AF em plantas não-adaptadas à condição nutricional elevada. A AF também foi menor em tratamentos com menores níveis de fertilização para as espécies *Acer platanoides* e *Betula pendula* (Black-Samuelsson & Andersson 2003). Em populações onde ocorre maior acúmulo de biomassa também podem ocorrer instabilidades de desenvolvimento que aumentam a AF (Evans & Marshall, 1996). Tais resultados podem ser avaliados dentro de um contexto de restauração ambiental em que plantas nativas eventualmente são fertilizadas. Se pode ocorrer um aumento de estresse por fertilização e aumento da AF, podem haver consequências para a *performance*, entendimento das interações animal-planta e o fitness das espécies, influenciando no sucesso da restauração ambiental.

Indivíduos da espécie *Tibouchina heteromalla* (Melastomataceae) crescendo em área de restauração ambiental apresentaram maiores níveis de AF e herbivoria por insetos em comparação com indivíduos que ocorrem em áreas naturais adjacentes em campos rupestres quartzíticos (Fernandes *et al.* 2016). A AF pode estar relacionada com a diminuição da capacidade de defesa contra herbivoria. A ocorrência de galhas em folhas maduras de *Bauhinia brevipes* (Fabaceae) está positivamente relacionada com o aumento na AF das folhas (Santos *et al.* 2013). Altos níveis de AF em *Heliocarpus pallidus* (Tiliaceae) foram relacionados com maior herbivoria em habitats com condições mais favoráveis para o crescimento da folha (Cuevas-Reyes *et al.* 2011). Além disso, AF em afeta a taxa de visitação



das flores e o potencial para a seleção pelo polinizador, porque, para os polinizadores uma flor simétrica é um indicador de qualidade (Moller & Eriksson 1994). West e Laverty (1998) também demonstrou que abelhas da espécie *Bombus impatiens* preferem flores simétricas e bilaterais ao invés do padrão radial. Em um experimento com diferentes níveis de poluentes, Mal *et al.* (2002) demonstraram o aumento da AF com o aumento de estresse ambiental em *L. salicaria* também afeta o crescimento de raízes, folhas e flores.

Nesse estudo a relação entre a AF e o conteúdo de N foliar ou a dureza nem sempre foi positiva, os padrões variaram entre espécies e entre níveis de adubação. Também não há na literatura um consenso sobre a relação entre a AF e N foliar. Para carvalhos, Cornelissen & Stiling (2005) demonstraram que folhas mais assimétricas de *Quercus geminata* e *Q. laevis* apresentavam maior conteúdo de nitrogênio foliar e menor conteúdo de compostos carbonados como taninos, indicando que sob condições de estresse ocorre redução da síntese proteica levando a aumento de N foliar disponível. Em contrapartida, o conteúdo de N foliar foi maior em folhas com menores níveis de AF para a espécie *B. brevipes* (Santos *et al.* 2013).

A alta frequência de FA nas folhas de *T. vauthieri*, *B. dracunculifolia*, *C. langsdorffii* e *E. macrostachya* reforça a hipótese de que tais espécies estão sob constante estresse ambiental nos campos rupestres ferruginosos. O aumento da assimetria em algumas dessas espécies pode estar relacionado à seleção de genótipos tolerantes as condições de pobreza nutricional e o acréscimo de minerais no solo pode induzir estresse adicional. Não há um padrão na relação entre AF e dureza ou N foliar, essas diferentes respostas entre espécies podem refletir seus níveis de tolerância. Os fortes filtros ambientais dos campos rupestres podem ser determinantes para a seleção de espécies e alta diversidade funcional.

Referências

- Ambo-Rappe R., Lajus D.L. & Schreider M.J. 2008. Increased heavy metal and nutrient contamination does not increase fluctuating asymmetry in the seagrass *Halophila ovalis*. *Ecological Indicators* 8: 100-103.
- Alves R.J.V., Silva N.G., Oliveira J.A. & Medeiros D. 2014. Circumscribing campo rupestre - megadiverse Brazilian rocky montane savannas. *Brazilian Journal of Biology* 74: 355-362.



- Antonovics J., Lovett J. & Bradshaw A.D.. 1967. The evolution of adaptation to nutritional factors in populations of herbage plants, Pp. 549-566. *In: Isotopes in plant nutrition and physiology*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Antonovics J. 1975. Metal tolerance in plants: perfecting an evolutionary paradigm. *International Conference on Heavy Metals*: 169-183.
- Beasley A.E., Bonisoli-Alquati A. & Mousseau T.A. 2013. The use of fluctuating asymmetry as a measure of environmentally induced developmental instability: A meta-analysis. *Ecological Indicators* 30: 218–226.
- Black-Samuelsson S. & Andersson S. 2003. The Effect of nutrient stress on developmental instability in leaves of *Acer platanoides* (Aceraceae) and *Betula pendula* (Betulaceae). *American Journal of Botany* 90: 1107-1112.
- Bloom A.J., Chapin III F.S. & Mooney H.A. 1985. Resource limitation in plants: an economic analogy. *Annual Review of Ecology and Systematics* 16: 363-392.
- Carmo F.F., Campos I.C. & Jacobi C.M. 2015. Effects of fine-scale surface heterogeneity on rock outcrop plant community structure. *Journal of Vegetation Science* 27: 50-59.
- Carmo F.F. & Jacobi C.M. 2015. Diversity and plant trait-soil relationships among rock outcrops in the Brazilian Atlantic rainforest. *Plant Soil* 403: 7-20.
- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. *Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. 5a Aproximação*, ed. A.C. Ribeiro P.T.G., Guimarães V.A., Alvares V. CFSEMG, Viçosa.
- Chapin F.S. III 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 11: 233-260.
- Chapin F.S. III 1991. Integrated Responses of Plants to Stress. *BioScience* 41: 29-36.
- Cornelissen T. & Stiling P. 2005. Perfect is best: low leaf fluctuating asymmetry reduces herbivory by leaf miners. *Oecologia* 142: 46–56.
- Cornelissen T & Stiling P. 2011. Similar responses of insect herbivores to leaf fluctuating asymmetry. *Arthropod-Plant Interactions* 5: 59–69
- Crawley, M. J. 2013. *The R Book*. John Wiley and Sons. New York. 2 ed. 1060p.



- Cuevas-Reyes P., Oyama K. González-Rodríguez A., Fernandes G.W. & Mendoza-Cuenca L. 2011. Contrasting herbivory patterns and leaf fluctuating asymmetry in *Heliocarpus pallidus* between different habitat types within a Mexican tropical dry forest. *Journal of Tropical Ecology* 27(4): 383-391.
- Evans A.S. & Marshall M., 1996. Developmental instability in *Brassica campestris* (Cruciferae): fluctuating asymmetry of foliar and floral traits. *Journal of Evolutionary Biology* 9: 717-736.
- Falconer D.S. 1981. Introduction to quantitative genetics. 2. ed. Longmans Green, London/New York. 386p.
- Fernandes G.W., Oliveira S.C.S., Campos I.R., Barbosa M., Soares L.A. & Cuevas-Reyes P. 2016. Leaf fluctuating asymmetry and herbivory of *Tibouchina heteromalla* in restored and natural environments. *Neotropical Entomology* 45: 44-49.
- Figueiredo M.A., Leite M.G.P. & Kozovits A.R. 2016. Influence of soil texture on nutrients and potentially hazardous elements in *Eremanthus erythropappus*. *International Journal of Phytoremediation* 18: 487-493.
- Giulietti, A.M.; Rapini, A.; Andrade, M.J.G; Queiroz, L.P. & Silva, J.M.C. (orgs.). 2009. Plantas raras do Brasil. Conservation International, Belo Horizonte. 496p.
- Jacobi, C.M.; Carmo, F.F.; Vincent, R.C. & Stehmann, J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops– a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity and Conservation* 16: 2185-2200.
- Jacobi, C.M.; Carmo, F.F. & Vincent, R.C. 2008. Vegetação sobre canga e seu potencial para reabilitação ambiental no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Árvore* 32: 345-353.
- Jacobi, C.M. & Carmo, F.F. 2008. Diversidade dos campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Megadiversidade* 4: 24-32.
- Jacobi, C.M. & Carmo, F.F. (orgs.). 2012. Diversidade florística nas Cangas do Quadrilátero Ferrífero. Ed. IDM, Belo Horizonte. 240p.
- Judd W.S., Campbell C.S., Kellogg E.A., Stevens P.F. & Donoghue M.J. 2009. Sistemática Vegetal – Um enfoque filogenético. 3 ed. Editora Artmed, Porto Alegre. 632p.



- Kazakou E., Dimitrakopoulos P.G., Baker A.J.M., Reeves R.D. & Troumbis A.Y. 2008. Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biological Review* 83: 495–508.
- Negreiros D., Esteves D., Fernandes G.W., Berbara R.L.L., Oki Y., Vichiato M. & Chalub C. 2014a. Growth-survival tradeoff in widespread tropical shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae) in response to a nutrient gradient. *Tropical Ecology* 55(2): 167-176.
- Negreiros D., Le Stradic S., Fernandes G.W. & Rennó H.C. 2014b. CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. *Plant Ecology* 215(4): 379-388.
- Mal T.K., Uveges J.L. & Turk K.W. 2002. Fluctuating asymmetry as an ecological indicator of heavy metal stress in *Lythrum salicaria*. *Ecological Indicators* 1:189-195.
- Mendonça, E.S. & Matos, E.S. *Matéria orgânica do solo; métodos de análises*. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107p.
- Messias, M.C.T.B., Leite, M.G.P., Meira-Neto, J.A.A. & Kozovits, A.R. 2012. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Acta Botanica Brasilica* 26: 230-242.
- Messias, M.C.T.B., Leite M.G.P., Meira-Neto J.A.A., Kozovits A.R. & Tavares R. 2013. Soil-vegetation relationship in quartzitic and ferruginous brazilian rocky outcrops. *Folia Geobotanica* 48:509–521.
- MØller A.P. & Eriksson M. 1994. Patterns of fluctuating asymmetry in flowers: implications for sexual selection in plants. *Journal of Evolutionary Biology* 7: 97-113.
- MØller A.P. 1995. Leaf-Mining Insects and Fluctuating Asymmetry in Elm *Ulmus glabra* Leaves. *Journal of Animal Ecology* 64: 697-707.
- MØller A.P. & Swaddle J.P. 1997. *Asymmetry, Developmental, Stability, and Evolution*. University Press, Oxford.
- Palmer A. R. 1996. Waltzing with asymmetry. *BioScience* 46: 518–532.
- Palmer R.A. & Strobeck C. 1986. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, and patterns. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17: 391–421.



- Palmer A.R. & Strobeck C. 2003. Fluctuating asymmetry analysis revisited. In: Polak M. (Ed.) *Developmental Instability: Causes and Consequences*. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, pp. 279–319.
- Parsons P. A. 1990. Fluctuating asymmetry: an epigenetic measure of stress. *Biological Reviews* 65: 131–145.
- Pérez-Harguindeguy N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M.S., Cornwell W. K., Craine J.M., Gurvich D.E., Urcelay C., Veneklaas E. J., Reich P.B., Poorter L., Wright I. J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A.C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J.G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., vanderHeijden M.G.A., Sack L., Blonder B., Poschlod P., Vaieretti M.V., Conti G., Staver A.C., Aquino S. & Cornelissen J.H.C. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61: 167-234.
- Ribeiro S.P., Londe V., Bueno A.P., Barbosa J.S., Corrêa T.L., Soeltl T., Maia M., Pinto V.D., Dueli G.F., Sousa H.C., Kozovits A.R. & Nalini-Jr H.A. 2016. Plant defense against leaf herbivory based on metal accumulation: examples from a tropical high altitude ecosystem. *Plant Species Biology* DOI: 10.1111/1442-1984.12136.
- Rhodes D. & Nadolska-Orczyk, A. 2001. Plant stress physiology. *Encyclopedia Of Life Sciences*: 1-7.
- Roy B.A. & Stanton M.L. 1999. Asymmetry in wild mustard, *Sinapis arvensis* (Brassicaceae), in response to severe physiological stresses. *Journal of Evolutionary Biology* 12: 440–449.
- Santos J.C., Alves-Silva E., Cornelissen T.G. & Fernandes G.W. 2013. The effect of fluctuating asymmetry and leaf nutrients on gall abundance and survivorship. *Basic and Applied Ecology* 14: 489-495.
- Schaefer C.E.G.R., Corrêa G.R., Candido H.G., Arruda D.M., Nunes J.A., Araujo R.W., Rodrigues P.M.S., Fernandes-Filho E.I., Pereira A.F.S., Brandão P.C. & Neri A.V. 2016. The physical environment of rupestrian grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: geological, geomorphological and pedological characteristics, and interplays



- in*: Fernandes G.W. (Ed.) Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil. Springer International Publishing, Switzerland. Pp: 15-53.
- Teixeira W.A. & Lemos-Filho J.P. 1998. Metais pesados em folhas de espécies lenhosas colonizadoras de uma área de mineração de ferro em Itabirito, Minas Gerais. *Revista Árvore* 22:381-388.
- Telhado C., Silveira F.A.O., Fernandes G.W. & Cornelissen T. 2016. Fluctuating asymmetry in leaves and flowers of sympatric species in a tropical montane environment. *Plant Species Biology*. doi: 10.1111/1442-1984.12122
- Viana, P.L. & J.A. Lombardi. 2007. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia* 58: 159-177.
- Vincent, R.C. & Meguro, M.M. 2008. Influence of soil properties on the abundance of plants species in ferruginous rocky soils vegetation, southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Botânica* 3: 377-388.
- West, E.L., Laverty, T.M., 1998. Effect of floral symmetry on flower choice and foraging behaviour of bumble bees. *Canadian Journal of Zoology* 76: 730-739.



Material suplementar 1: Informações sobre nove espécies ocorrentes em campos rupestres ferruginosos selecionadas para estudo. A distribuição se refere a outras fitofisionomias em que as espécies ocorrem além dos campos rupestres ferruginosos.

Espécie	Hábito	Distribuição	Referência
<i>Baccharis dracunculifolia</i> (Asteraceae)	Arbusto	Florestas mistas, mata atlântica, pampas e cerrado	Oliveira-Filho & Scolforo 2008; Negreiros <i>et al.</i> 2009; Medeiros 2011
<i>Eremanthus erythropappus</i> (Asteraceae)	Árvore	Amazônia, cerrado e mata atlântica	Venturin <i>et al.</i> 2005; Oliveira-Filho & Scolforo 2008
<i>Lychnophora pinaster</i> (Asteraceae)	Arbusto	Cerrado, campos rupestres	Semir 1991; Silveira <i>et al.</i> 2005; Medeiros 2011
<i>Trixis vauthieri</i> (Asteraceae)	Arbusto	Cerrado e campos rupestres quartzíticos	Jacobi <i>et al.</i> 2008
<i>Copaifera langsdorffii</i> (Fabaceae)	Árvore	Florestas úmidas, secas e cerrado	Pedroni <i>et al.</i> 2002; Oliveira-Filho & Scolforo 2008; Jacobi <i>et al.</i> 2008
<i>Mimosa calodendron</i> (Fabaceae)	Arbusto	Campos rupestres ferruginosos - restrita	Mourão <i>et al.</i> 2006; Jacobi <i>et al.</i> 2008
<i>Tibouchina candoleana</i> (Melastomataceae)	Árvore	Cerrado, florestas ombrófilas, semidecíduas e campo rupestre quartzítico	Jacobi <i>et al.</i> 2008; Oliveira-Filho & Scolforo 2008; Medeiros 2011, Messias <i>et al.</i> 2012
<i>Tibouchina heteromalla</i> (Melastomataceae)	Arbusto	Bordas de mata, floresta ombrófila, cerrado	Baider <i>et al.</i> 1999; Jacobi <i>et al.</i> 2007
<i>Eriope macrostachya</i> (Lamiaceae)	Arbusto	Caatinga, cerrado, floresta ombrófila e seca	Viana & Lombardi 2007; Jacobi <i>et al.</i> 2008

Referências

Baider C., Tabarelli M. & Mantovani W. 1999. O banco de sementes de um trecho de uma Floresta Atlântica Montana (São Paulo - Brasil). *Revista Brasileira de Biologia* v. 59, 319-328.



- Flora do Brasil 2020 em construção. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil>>. Acesso em: 18 Nov. 2016
- Jacobi C.M., Carmo F.F., Vincent R.C. & Stehman J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity Conservation* 16:2185-2200.
- Jacobi C.M., Carmo F.F. & Vincent R.C. 2008. Estudo fitossociológico de uma comunidade vegetal sobre canga como subsídio para a reabilitação de áreas mineradas no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Árvore* 32: 345-353.
- Medeiros J.D. 2011. Guia de campo: vegetação do Cerrado 500 espécies. Brasília: MMA/SBF. 532 p.
- Messias M.C.T.B., Leite M.G.P., Meira-Neto J.A.A. & Kozovits A.R. 2012. Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Acta Botanica Brasilica* 26(1): 230-242.
- Mourão F.A., Carmo F.F., Rattón P. & Jacobi C.M. 2006. Hospedeiras de *Struthanthus flexicaulis* (Loranthaceae) em campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Lundiana* 7:103-109.
- Negreiros D., Fernandes G.W., Silveira F.A.O. & Chalub C. 2009. Seedling growth and biomass allocation of endemic and threatened shrubs of rupestrian fields. *Acta Oecologica* 35: 301-310.
- Oliveira-Filho A.T. & Scolforo J.R.S. 2008. Inventário do estado de Minas Gerais: espécies arbóreas da flora nativa. Lavras: Editora UFLA. 619p.
- Pedroni F., Sanchez M. & Santos F.A.M. 2002. Fenologia da copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf. – Leguminosae. Caesalpinioideae) em uma floresta semidecídua no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Botânica* 25(2): 183-194.
- Semir J. 1991. Revisão taxonômica de *Lychnophora* Mart. (Vernonieae: Compositae) 2v. Campinas, 515p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Universidade Estadual de Campinas.
- Silveira D., Wagner H., Chiare E., Lombardi J.A., Assunção A.C., Oliveira A.B. & Raslan D.S. 2005. Biological activity of the aqueous extract of *Lychnophora pinaster* Mart. *Revista Brasileira de Farmacognosia* 15(4): 294-297.
- Venturin N., Souza P.A., Macedo R.L.G. & Nogueira F.D. 2005. Adubação mineral da candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) McLeish). *Floresta* 35(2): 211-219.



Viana P.L. & Lombardi J.A. 2007. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia* 58:159-177.

Material suplementar 2: Efeito do enriquecimento nutricional do substrato sobre as variáveis estudadas após 150 dias de experimento para nove espécies ocorrentes em campos rupestres ferruginosos. Média e erro padrão de cada resposta por tratamento.

Espécie/ Variáveis resposta	p	gl	Teste F	Controle		NPK/100		NPK/10		NPK		Orgânico		Viveiro	
				μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±
<i>Baccharis dracunculifolia</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	33	F= 20.17	0.018	0.01	0.061	0.009	0.194	0.066	0.078	0.032	13.359	2.897	6.225	2.035
Comprimento total(mm)	0.001	33	F= 17.118	115	35	191.25	13.287	320.12	70.801	190	24.899	1680	252.77	923.75	205.35
Razão raiz-ramo	0.001	33	F= 11.395	1.444	0.535	0.753	0.079	0.410	0.059	0.912	0.185	0.386	0.047	0.218	0.053
Número de folhas (unid)	0.001	33	F= 23.186	8.5	4.5	12.25	1.25	18.25	2.234	13	2.28	414.142	61.739	198.62	61.596
Área foliar (mm)	0.001	33	F= 23.518	32.091	15.324	126.222	27.849	176.53	41.155	113.75	39.252	516.954	35.431	437.76	32.114
<i>Eremanthus erythropappus</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	31	F= 23.321	0.029	0.005	0.018	0.004	0.02	0.006	0.024	0.01	-	-	2.566	0.824
Comprimento total(mm)	0.001	31	F= 17.858	88.041	12.206	139.092	29.153	113.62	14.721	71.433	10.169	-	-	512.36	106.61
Razão raiz-ramo	0.01	31	F= 4.516	0.843	0.131	2.174	0.920	0.541	0.072	1.098	0.334	-	-	0.221	0.026
Número de folhas (unid)	0.001	31	F= 7.346	8	0.6	6.2	1.019	6.142	0.633	7.333	0.666	-	-	13.625	2.086
Área foliar (mm)	0.001	31	F= 54.474	72.265	15.715	34.564	10.961	118.25	37.74	37.152	9.065	-	-	424.30	83.748
<i>Lychnophora pinaster</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	21	F= 11.666	0.025	0.013	0.014	0.009	0.005	0.002	0.011	0.005	0.008	0.001	0.194	0.057
Comprimento total(mm)	0.001	21	F= 41.173	68.41	14.941	81.743	16.591	41.412	4.491	62.006	17.207	62.493	8.386	293.93	5.773
Razão raiz-ramo (mm)	0.01	21	F= 4.943	0.481	0.086	0.790	0.088	0.748	0.085	0.697	0.148	0.680	0.143	0.154	0.011
Número de folhas (unid)	0.001	21	F= 17.443	16.666	4.038	18	3.511	9	1.914	12.333	3.282	15	3.511	53	0.577
<i>Trixis vauthieri</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	55	F= 141.83	2.336	0.179	2.078	0.166	2.58	0.451	1.925	0.313	30.04	2.506	11.333	1.12
Comprimento total(mm)	0.01	55	F= 3.086	1272.5	113.396	1102.38	107.44	960.33	87.412	1011.7	120.78	1467.5	97.636	1125.9	112.26
Razão raiz-ramo	0.001	55	F= 7.354	0.840	0.040	0.876	0.095	0.659	0.051	0.554	0.043	0.726	0.107	0.375	0.039
Número de folhas (unid)	0.001	55	F= 132.95	43.1	2.115	41.375	1.084	49.888	3.203	48	2.828	201.2	11.152	99.2	7.732
Área foliar (mm)	0.001	55	F= 95.005	66.379	7.486	51.597	8.037	51.994	6.226	39.193	4.796	363.816	21.568	234.19	24.813
<i>Mimosa calodendron</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	34	F= 26.28	0.072	0.009	0.052	0.005	0.264	0.158	0.105	0.024	1.411	0.005	3.141	0.743
Comprimento total(mm)	0.001	34	F= 23.411	406.75	44.899	189.95	30.734	426.2	146.73	378.57	44.373	775	0.577	1134.2	74.353
Razão raiz-ramo	0.001	34	F= 7.174	1.381	0.190	1.008	0.127	1.001	0.230	1.144	0.169	0.397	0.057	0.394	0.029
Número de folhas (unid)	0.001	34	F= 12.424	8.125	1.469	7	0.707	6.6	1.208	6	0.577	18	0.577	20.25	3.051
Área foliar (mm)	0.001	34	F= 60.263	90.372	8.775	108.268	21.867	234.22	93.804	188.57	42.681	1002.02	5.773	1730.9	179.75

Espécie/ Variáveis resposta	p	Df	Teste	Controle		NPK/100		NPK/10		NPK		Orgânico		Viveiro	
				μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±	μ	SE±
<i>Copaifera. langsdorffii</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	59	F= 9.892	1.969	0.161	2.418	0.237	3.867	0.345	1.722	0.101	2.285	0.253	2.511	0.256
Comprimento total(mm)	0.79	59	F= 0.466	714	105.721	876	86.666	740.5	117.788	690.5	135.42	765	87.844	853.5	110.50
Razão raiz-ramo	0.03	59	F= 2.566	0.453	0,035	0.427	0.031	0.446	0.029	0.407	0.041	0.297	0.031	0.411	0.042
Número de folhas (unid)	0.001	59	F= 8.256	4.4	0.266	5.9	0.766	8.9	0.822	4.4	0.266	8.1	0.912	6.5	0.749
Área foliar (mm)	0.3	59	F= 1.235	38.997	2.952	45.72	2.11	45.8	3.443	40.943	3.099	49.988	3.557	45.199	5.28
<i>Tibouchina candoleana</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	47	F= 461.8	0.0024	0.003	0.0019	0.006	0.0009	0.0001	0.001	0.0001	0.049	0.0006	6.419	0.5713
Comprimento total(mm)	0.001	47	F= 318.2	40.665	4.134	34.011	5.897	28.852	5.061	30.298	3.889	135.82	21.729	905.56	37.587
Razão raiz-ramo	0.001	47	F= 7.991	1.200	0.283	1.677	0.337	0.388	0.099	0.749	0.211	0.124	0.009	0.457	0.038
Número de folhas (unid)	0.001	47	F= 86.02	8.125	0.666	8.75	1.064	9.125	0.639	7.5	0.707	13.75	1.264	34.125	1.826
<i>T. heteromalla</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	55	F= 86.251	0.026	0.015	0.036	0.032	0.002	0.0003	0.003	0.0007	0.514	0.242	4.226	0.436
Comprimento total(mm)	0.001	55	F= 14.977	39.897	4.632	35.801	5.635	29.16	3.462	40.707	6.039	24.962	3.785	74.35	4.228
Razão raiz-ramo	0.01	55	F= 4.587	0.757	0.315	0.987	0.245	1.199	0.321	0.584	0.106	0.205	0.024	0.576	0.070
Número de folhas (unid)	0.001	55	F= 7.853	9.1	1.026	10.875	0.953	10.2	0.866	11.333	0.552	10.666	0.577	20.6	3.106
<i>E. macrostachya</i>															
Biomassa seca total (g)	0.001	46	F= 88.214	0.127	0.071	0.165	0.048	0.236	0.067	0.054	0.017	14.007	1.346	12.194	2.075
Comprimento total(mm)	0.001	46	F= 22.5	453.166	171.921	388.57	61.737	739	146.70	353.66	91.724	1545.5	90.171	1620	122.83
Razão raiz-ramo	0.001	46	F= 14.909	0.735	0.219	1.459	0.081	0.547	0.102	1.098	0.182	0.382	0.040	0.325	0.062
Número de folhas (unid)	0.001	46	F= 83.077	6.833	1.071	10.714	1.228	13.4	1.137	10.833	0.654	221.55	25.921	205.66	28.956
Área foliar (mm)	0.001	46	F= 87.081	42.702	27.52	117.064	46.565	193.825	34.898	48.603	14.325	2561.7	257.80	2198.5	250.83