

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, CONSERVAÇÃO E
MANEJO DA VIDA SILVESTRE

Lucas Barbosa Souza Tameirão

FILTROS AMBIENTAIS E ATRIBUTOS
FUNCIONAIS EM VEGETAÇÃO DE CAMPO
RUPESTRE FERRUGINOSO

Belo Horizonte

2017

LUCAS BARBOSA SOUZA TAMEIRÃO

**FILTROS AMBIENTAIS E ATRIBUTOS FUNCIONAIS EM VEGETAÇÃO DE
CAMPO RUPESTRE FERRUGINOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Orientador:

Prof. Dr. Geraldo Wilson Fernandes

Co-orientador:

Prof. Dr. Daniel Negreiros

Belo Horizonte

2017

“Sem sair pela porta,

Conheça o mundo.

Sem espiar pela janela,

Veja o TAO do céu.

Quanto mais você viajar,

Menos saberá...”

Lao-Tzu

AGRADECIMENTOS

Eu sou grato ao meu orientador Geraldo Wilson Fernandes, o Geraldinho, pela troca de ideias e por fornecer o apoio, a estrutura e o suporte necessários para a execução deste projeto;

Sou grato ao meu co-orientador Daniel Negreiros, pela amizade, pelas trocas de idéias e por auxiliar da melhor maneira que pôde na construção do meu pensamento crítico sobre o trabalho, transmitindo seus conhecimentos sobre a ecologia dos campos rupestres;

Sou grato ao professor Simon Pierce pelo bom exemplo como professor e pelas inspiradoras saídas a campo onde pude aprender um pouco mais sobre ecologia funcional;

Sou grato a professora Maria das Dores por compartilhar dados fundamentais a este estudo e pela convivência nas saídas a campo. Agradeço ao professor Ricardo L. L. Berbara pelo auxílio com as análises de solo;

Sou grato ao meu Pai, Maurício e a minha Mãe, Iolanda, por alicerçarem minha educação e apoiarem incondicionalmente meus estudos e minha formação pessoal;

Sou grato a Mirza, minha namorada, pela paciência, incentivo e carinho durante a escrita do trabalho;

Sou grato a toda a equipe do Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade e pelos que por lá passaram, pela amizade, pelas boas conversas, pela disponibilidade em auxiliar a resolver qualquer questão e pelos bons conselhos a respeito do cotidiano acadêmico. Em especial à Leandra, Irene, Thaise e Hernani, por terem alguma paciência comigo;

Sou grato a Jéssica, Daniele, Adriana e Danielle que de perto deram uma força boa tanto em campo quanto no laboratório para que o projeto chegasse à realidade;

Sou grato à equipe do Laboratório de Sistemática Vegetal e aos especialistas Renato Mello-Silva, Rosana Romero e Gustavo Heiden pelo grande auxílio na identificação das espécies coletadas;

Sou grato aos colegas do mestrado e do curso de campo, pelos momentos compartilhados e por de alguma maneira terem auxiliado na minha construção profissional;

Sou grato ao IEF e aos gestores do Parque Estadual da Serra do Rola-Moça pelo apoio aos trabalhos em sua área;

Sou grato a CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado;

Sou grato ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação / Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a Fapemig / Vale pelo apoio financeiro ao projeto.

FILTROS AMBIENTAIS E ATRIBUTOS FUNCIONAIS EM VEGETAÇÃO DE CAMPO RUPESTRE FERRUGINOSO

Lucas B. S. Tameirão^{1*}, Daniel Negreiros², Maria das Dores M. Veloso³, Ricardo L. L. Berbara⁴, G. Wilson Fernandes¹

¹Ecologia Evolutiva e Biodiversidade/Departamento de Biologia Geral, CP 486, Instituto de Ciências Biológicas/Universidade Federal de Minas Gerais, 30161-970. Belo Horizonte, MG, Brasil;

²Instituto de Ciências Biológicas e Saúde, Centro Universitário UNA, 30180-100. Belo Horizonte, MG, Brasil;

³Centro de Ciências Biológicas e da Saúde/Departamento de Biologia, Universidade Estadual de Montes Claros, 39401-089. Montes Claros, MG, Brasil.

⁴Biologia de Solos/Departamento de Solos, Instituto de Agronomia/Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 223890-000. Seropédica, RJ, Brasil.

*Autor correspondente:

e-mail: lbstameirao@gmail.com; telefone: +55 31 99825 9029

(Manuscrito formatado segundo as normas da revista Plant Ecology)

RESUMO

Atributos funcionais podem fornecer pistas importantes para o entendimento da dinâmica e estrutura de comunidades ecológicas. Neste trabalho testou-se a hipótese de que existe uma co-estrutura entre os parâmetros ambientais da vegetação arbustiva dos campos rupestres ferruginosos e a composição desta comunidade. Adicionalmente testamos a hipótese de que há prevalência da estratégia estresse-tolerante e de traços que aumentam a conservação de recursos na vegetação. Através da avaliação da composição química do solo, de atributos funcionais e estratégias ecológicas caracterizou-se os parâmetros ambientais, relacionando-os à composição da comunidade. Foi observada uma vegetação altamente moldada pelo estresse, com as plantas exibindo valores de estresse-tolerância entre 72,6% e 100%, se contrapondo a ruderalidade que foi zero para todas as plantas. Foi possível observar uma forte co-estrutura entre os atributos

funcionais e a fertilidade do solo com a composição da comunidade ($RV = 0,45$; $p < 0,001$). O eixo 1 da co-inércia mostra que alguns parâmetros ambientais (e. g. área foliar, saturação por alumínio, competitividade, teor de fósforo e carbono, estresse-tolerância) influenciam de forma contrastante a comunidade dos campos rupestres ferruginosos. Áreas com relativamente menos matéria orgânica, menos fósforo e menos ácidas abrigaram uma vegetação com maior competitividade, com folhas maiores e maior área foliar específica, enquanto áreas com relativamente mais matéria orgânica, mais fósforo e mais ácidas abrigaram vegetação mais estresse-tolerante, com folhas menores e área foliar específica menor. Esta associação das espécies com habitats específicos nos campos rupestres ferruginosos é potencialmente importante para a ecologia da restauração, pois, nota-se que as espécies se distribuíram na comunidade de acordo com as características do solo e os atributos funcionais de cada área. Assim algumas espécies são potencialmente mais adequadas que outras para restaurar áreas de campo rupestre ferruginoso com diferentes parâmetros ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Ambiente extremo, ecologia funcional, canga, cadeia do espinhaço, CSR, estratégias de sobrevivência.

ABSTRACT

Functional traits can provide important clues for understanding the dynamics and structure of ecological communities. Here we tested the hypothesis that there is a co-structure between environmental parameters and the community composition of the shrub vegetation in ferruginous rupestrian grasslands. Additionally, we tested if there is a prevalence of the stress-tolerant strategy and traits that maximise resource conservation in the community. Through the evaluation of soil fertility, functional traits and ecological strategies, the environmental parameters were characterized, relating them to the composition of the community. A highly stress-tolerant vegetation was observed, with plants exhibiting stress-tolerance values between 72.6% and 100%, counteracting ruderality was zero for all plants. We identify a strong co-structure between functional traits and soil fertility with community composition ($RV = 0.45$, $p < 0.001$). Co-inertia axis 1 shows that some environmental parameters (e.g. leaf area, aluminum saturation, competitiveness, phosphorus and carbon content, stress-tolerance) influence the community of ferruginous rupestrian fields in a contrasting way. Areas with relatively less organic matter (i.e. carbon), less phosphorus and less acidity had a more

competitive vegetation, with larger leaves and a larger specific leaf area, while areas with relatively more organic matter, more phosphorus and more acidity had more stress-tolerant vegetation with smaller leaves and smaller specific leaf area. This association of species with specific habitats in ferruginous rupestrian grasslands is potentially important for the restoration ecology, because it is noteworthy that species were distributed in community according to soil characteristics and the functional traits of each area. Thus some species are potentially more suitable than others to restore areas of ferruginous rupestrian grasslands with different environmental parameters.

KEYWORDS: CSR, extreme environment, functional ecology, espinhaço range, ironstone outcrops, survival strategies.

INTRODUÇÃO

Atributos funcionais de plantas podem ser ferramentas importantes para o entendimento da dinâmica e estrutura de comunidades ecológicas e como elas respondem a distúrbios naturais e antrópicos. Os atributos funcionais são definidos como qualquer característica mensurável no indivíduo que afeta direta, ou indiretamente, seu *fitness* (Violle et al. 2007). Assim, em último caso toda a estrutura da comunidade e a dinâmica e funcionamento do ecossistema podem ser influenciados pelos atributos de cada espécie (Díaz et al. 2004, Dray et al. 2014). Sob esta perspectiva, diversos estudos têm buscado explicar o funcionamento das comunidades e ecossistemas em diversos biomas (Chai et al. 2015, de Paula et al. 2015, Pierce et al. 2016).

Em alguns casos os parâmetros ambientais atuam como filtros, influenciando diretamente os atributos funcionais e estratégias ecológicas das plantas (Pierce et al. 2007, Negreiros et al. 2014). Estes filtros são particularmente intensos em ecossistemas como os campos rupestres ferruginosos (CRF), que abrigam uma vegetação singular, endêmica e seriamente ameaçada (Carmo e Jacobi 2013, Jacobi et al. 2007). Por exemplo, os solos são rasos e com baixa capacidade de retenção de água. O que faz com que as plantas, para sobreviver ali, sejam adaptadas morfológica e fisiologicamente para adquirir e utilizar a água de maneira eficiente (Jacobi et al. 2007). A baixa disponibilidade de nutrientes também limita a distribuição das plantas no ambiente (Lambers et al. 2008). Aqui pretendemos descobrir de qual maneira e com qual intensidade a composição da comunidade é influenciada pelo ambiente e, além disso,

qual o efeito dos atributos funcionais sobre a comunidade (Díaz et al. 2004). Assim, esta abordagem funcional pode auxiliar a compreender como características ambientais consideradas extremas atuam sobre esta vegetação rica e diversa (Skirycz et al. 2014).

As comunidades vegetais dos CRF são basicamente controladas por fatores edafoclimáticos (Jacobi et al. 2007, Schaefer et al. 2015) que atuam como importantes filtros no estabelecimento da comunidade vegetal e fazem deste ambiente um lugar aparentemente severo. Estes campos estão expostos a altos índices de exposição aos raios ultravioleta (UV), altas temperaturas diárias, ventos fortes e baixa capacidade de retenção de água (Jacobi e Carmo 2008). Os solos são escassos, nutricionalmente pobres, ácidos e contêm níveis altos de metais pesados (e.g. Mn) e alumínio (Skirycz et al. 2014). Assim, é comum encontrar na região plantas metalófitas, capazes de absorver íons presentes no solo e acumular em seus tecidos (Messias et al. 2013, Oliveira et al. 2016). Entretanto, estas condições sustentam uma vegetação rica, com até 1100 espécies de plantas vasculares encontradas em uma área menor que 0,5ha (Jacobi e Carmo 2012). Esta riqueza é comparável à de outras paisagens com características semelhantes, como os *fynbos* na África e o *kwongkan* na Austrália, consideradas importantes centros de riqueza e endemismo para a vegetação (Hooper 2009).

Em meio a grande diversidade de plantas, cada uma delas pode adquirir, processar e investir recursos de formas diferentes e isso tem grandes efeitos na composição das espécies e funcionamento dos ecossistemas (Chapin et al. 2000; Loreau et al. 2001). Uma ferramenta amplamente conhecida para avaliar esta diversidade funcional é o esquema de estratégias ecológicas CSR (C: competitivo, S: estresse-tolerante, R: ruderal; Grime 2001, Grime e Pierce 2012, Pierce et al. 2016), no qual um conjunto de atributos funcionais delimita estratégias de sobrevivência nas plantas. Este conjunto é formado por atributos de fácil medição quase sempre bons correlatos de habilidades funcionais chave para as plantas (e.g. taxa de decomposição foliar, durabilidade foliar, taxa de crescimento relativo) (Díaz et al. 2004, Garnier et al. 2016). Além disso, são facilmente mensuráveis em um grande número de espécies (Pérez-Harguindeguy et al. 2013) o que permite a replicação do estudo e a comparação dos resultados em diferentes comunidades (Díaz et al. 2016, Pierce et al. 2016).

Através desta ferramenta já foi possível identificar efeitos mútuos e divergentes de nutrientes do solo (N e P) sobre as estratégias ecológicas, sugerindo a existência de

um complexo mecanismo de regulação da fertilidade sobre os atributos (Fujita et al. 2013). Com esta base teórica sólida que a teoria CSR fornece, também é possível usar os atributos funcionais como ferramenta preditiva, por exemplo, na restauração de ecossistemas, o que pode trazer grandes avanços e novas perspectivas nesta área ainda pouco explorada. Uma meta-análise de 25 experimentos em vegetação campestre em processo de restauração avaliou o desempenho das plantas em relação aos seus atributos funcionais (Pywell et al. 2003). Os autores encontraram grandes diferenças no desempenho entre as espécies. Aquelas que se estabeleceram e persistiram na comunidade vegetal restaurada possuíam atributos ligados à boa habilidade de colonização, forte capacidade competitiva, habilidade de passar por regeneração vegetativa e geralmente possuíam características generalistas associadas a habitats férteis. Este conhecimento é de grande relevância para a restauração de ambientes extremos, onde os filtros ambientais atuam de forma intensa. Descobrir esta relação entre atributos e o ambiente podemos chegar às espécies ideais para restaurar cada tipo de ecossistema. Negreiros et al. (2014) examinaram as características funcionais de duas comunidades herbáceas de campo rupestre quartzítico (campo pedregoso e campo arenoso) submetidas a estresse ambiental, evidenciando o papel dos filtros ambientais na determinação da diversidade e caráter funcional das plantas nesses habitats. Neste trabalho os autores confirmaram uma forte conexão entre os atributos da vegetação e a estrutura do habitat e mostraram que a vegetação do campo rupestre apresenta alto grau de estresse-tolerância. No entanto, quando se trata dos CRF ainda há muito que se conhecer de seu aspecto funcional, para saber de qual maneira o ambiente influencia a vegetação e vice versa.

No presente estudo avaliamos a importância relativa das estratégias CSR na vegetação de campo rupestre ferruginoso, determinando as estratégias ecológicas da comunidade arbustiva. O foco deste estudo foi nas espécies arbustivas do CRF tendo em vista sua importância na composição da paisagem destes campos, sendo responsáveis por mais de 50% da cobertura vegetal na área de estudo (Carmo e Jacobi 2015). Nesse contexto, testamos a hipótese de que a composição da comunidade arbustiva dos CRF está correlacionada aos parâmetros ambientais do hábitat. Espera-se que áreas com maior teor de matéria orgânica, mais fósforo, menor acidez, com mais bases trocáveis (i.e. áreas menos inférteis) abriguem espécies com maior área foliar e maior grau de competitividade, enquanto áreas com menos matéria orgânica, fósforo, bases trocáveis e

maior acidez (i.e. áreas mais inférteis) abriguem espécies com maior grau de estresse-tolerância. Adicionalmente testamos a hipótese de que há uma prevalência da estratégia S (estresse-tolerante) e de atributos que aumentem a conservação e proteção dos recursos na comunidade arbustiva, como um maior conteúdo de matéria seca foliar. Espera-se que ambientes cronicamente improdutivos favoreçam espécies com atributos da síndrome de tolerância ao estresse (Chapin et al. 1993, Negreiros et al. 2014).

MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado no Parque Estadual da Serra do Rola-Moça (20°03'07"S, 44°00'06"W), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil e no seu entorno no período entre Janeiro e Março de 2016. A região pertence ao Quadrilátero Ferrífero, localizado na porção sul da Cadeia do Espinhaço e inserido na zona de transição entre dois *hot spots* da biodiversidade (*sensu* Myers et al., 2000), o Cerrado e a Mata Atlântica, o Quadrilátero Ferrífero recebe influências destes dois biomas sobre sua fauna e flora ao longo dos seus 7.200 km² de extensão (Jacobi e Carmo 2012). A região concentra diversas minas de ferro e exibe afloramentos rochosos hematíticos vegetados por campos rupestres ferruginosos, também conhecidos como canga (Rizzini, 1979). Estes campos ocorrem em altitudes superiores a 900m e possuem alta diversidade florística, sendo mais de 30% de suas espécies endêmicas (Jacobi e Carmo 2008), possuem também dezenas de espécies raras (Giulietti et al. 2009) além de elevadas diversidades alfa e beta (Jacobi e Carmo 2008). O regime climático na região é mesotérmico com invernos secos de abril a outubro e verões chuvosos de novembro a março (Cwb segundo a classificação de Köppen). A média de pluviosidade anual é de 1,250 mm e a temperatura média anual é de 20°C (Messias et al. 2013).

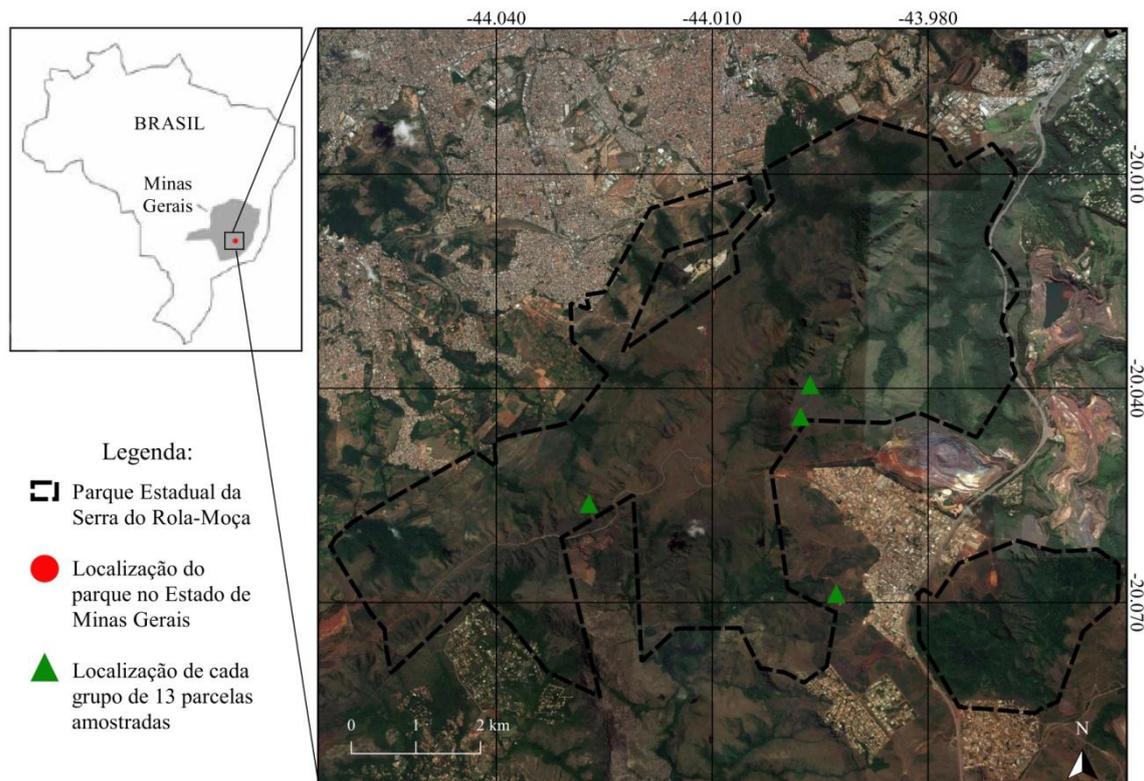


Figura 1 – Mapa da região do Parque Estadual da Serra do Rola-Moça, inserido no Quadrilátero Ferrífero, na porção meridional da cadeia do espinhaço em Minas Gerais, Brasil.

Análise de solo

Análises de solo foram feitas em 52 parcelas de 10 m². Em cada parcela foram coletadas cinco amostras de solo nos quatro vértices e no centro da parcela, na profundidade de zero a 10 cm. As amostras foram secas à sombra, destorroadas, homogeneizadas e enviadas para análise química da fertilidade do solo ao Laboratório de Biologia do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Seleção e amostragem das espécies

Com base em dados fitossociológicos disponíveis em Souza et al. (em preparação) foram selecionadas espécies vegetais para as medidas de atributos funcionais. A seleção foi feita baseada no IVI de modo a incluir tanto as espécies mais frequentes, quanto as raras encontradas no hábitat. As coletas de material vegetal foram realizadas nas plantas que ocorreram dentro e no entorno de 52 parcelas utilizadas no levantamento fitossociológico. As parcelas estavam distribuídas em quatro áreas,

distantes entre si em pelo menos 1km. Cada área possuía 13 parcelas de 10 m x 10 m, distantes dez metros entre si, dispostas em um transecto linear.

Em cada espécie foram amostrados seis indivíduos adultos e saudáveis. As coletas foram realizadas no auge da estação chuvosa, o período mais favorável ao crescimento nos campos rupestres. Todas as medidas de área foliar, largura massa fresca e massa seca seguiram os protocolos estandardizados extensivamente descritos por Pérez-Harguindeguy et al. (2013).

Para calcular os atributos funcionais e as estratégias CSR foram coletadas rametas inteiras no campo, para evitar a dessecação do material foliar. Foi evitado o horário de maior incidência solar (10-15 horas), pois neste período as plantas perdem mais água se forem coletadas. As rametas coletadas foram imediatamente saturadas com água usando um borrifador de água, embaladas em sacos de papel umedecidos, que foram selados em saco plástico e armazenados em caixa térmica até o transporte para o laboratório. O material vegetal foi mantido em geladeira a 4°C por no mínimo 12 horas para obtenção da completa turgidez antes das medições.

Três atributos foliares são necessários aos cálculos das estratégias CSR: área foliar específica, conteúdo de matéria seca foliar e área foliar (Pierce et al. 2013) (respectivamente SLA, LDMC e LA, em inglês, Garnier et al. 2016). As medidas de área foliar, massa fresca e massa seca foram feitas em duas folhas (incluindo o pecíolo) por indivíduo em até 48 horas após a coleta em campo. Foram amostradas apenas folhas jovens completamente expandidas e endurecidas, sem sinais de patógenos, herbivoria ou má formação. Obteve-se a área foliar e a largura foliar com uso de um escâner de mesa e o software SigmaScan Pro v.5.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL). Folhas curvadas foram cortadas em fragmentos e posicionadas de maneira a entrarem totalmente em contato com a superfície do escâner. A massa fresca foliar foi obtida nas folhas túrgidas previamente secas com papel toalha macio, e a massa seca foliar foi determinada após 96 horas de secagem em estufa a 60°C. Ambas em balança analítica (precisão de 0,1 mg).

Para testar a hipótese de correlação entre a composição da comunidade e os parâmetros ambientais utilizou-se a análise de co-inércia (daqui em diante COIA). Este método mede a co-estrutura entre conjuntos de dados multivariados que compartilham objetos em comum, neste caso, as 52 parcelas (Dray et al. 2003). Esta abordagem foi aplicada para quantificar e testar a associação entre a matriz florística, com dados de

incidência e a matriz ambiental, com dados de fertilidade do solo, atributos foliares e estratégias ecológicas. Para os atributos funcionais foi calculado o CWM (community-weighted mean, em inglês), gerando um valor médio dos atributos das espécies dominantes em cada parcela. As análises foram feitas no ambiente R (R Development Core Team, 2015) com uso do pacote “ade4” (Dray e Dufour 2007) e de algumas funções providas por Pavoine et al. (2011).

A classificação das espécies nas categorias de estratégias CSR (dentre os 19 tipos possíveis) foi feita com o uso da planilha disponível em Pierce et al. (2016). Para avaliar a importância relativa das estratégias C, S e R nos campos rupestres ferruginosos sobre canga, foi determinada a somatória da importância relativa (IVI, de acordo com Mueller-Dombois e Ellenberg 1974) das espécies pertencentes a cada estratégia ecológica (dentre as 19 possíveis; veja Pierce et al. 2013).

RESULTADOS

Foram encontradas 30 espécies de plantas pertencentes a 12 famílias (Anexo 1). Dentre estas, 13 são espécies endêmicas do campo rupestre e uma delas, *Lychnophora pinaster*, está vulnerável à extinção (COPAM 2009). A investigação das estratégias ecológicas revelou uma vegetação altamente moldada pelo estresse (Figura 2). Todas as plantas do CRF estudadas aqui exibem valores de estresse-tolerância entre 72,6% e 100%. 26 delas (87%) são classificadas como estrategistas S e as quatro restantes (13%) são classificadas como S/SC (*sensu* Hodgson et al. 1999). *Microlicia pseudoscoparia* e *L. pinaster* são as espécies mais estresse tolerantes, ambas com assinatura CSR de 0:100:0% (C:S:R). Enquanto *Trixis vauthieri* (27:73:0%), *V. compacta* (22:78:0%) e *Tibouchina heteromalla* (21:79:0%) se destacam por valores relativamente mais elevados competitividade. Todas as espécies estudadas exibiram valores de ruderalidade igual a zero (Anexo 2).

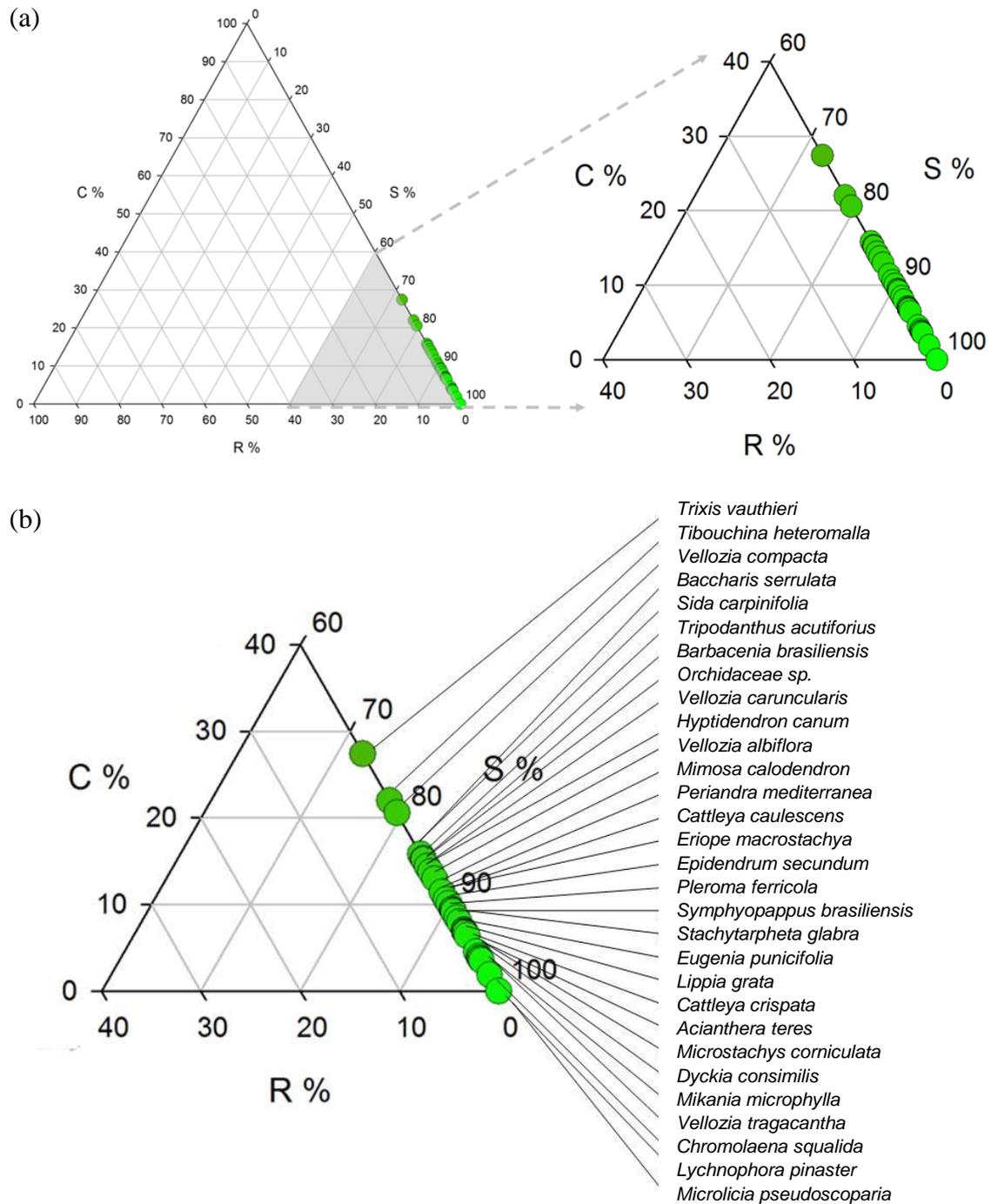


Figura 2 – a: Proporção relativa (%) de C-, S- e R-seleção para 30 espécies de arbustos medidos em Campo Rupestre Ferruginoso na Serra do Rola Moça, MG, Brasil, com o uso da ferramenta analítica *StrateFy* disponível em Pierce et al (2016). C: competitividade; S: estresse-tolerância; R: ruderalidade. b: Identificação de cada espécie e sua proporção de C% S % e R%

A vegetação se desenvolve sobre um solo com acidez elevada em algumas áreas e muito elevada em outras, variando entre 4.0 e 5.0. Os teores de matéria orgânica,

fósforo e bases trocáveis também variam muito entre as áreas, com algumas delas tendo até três vezes mais matéria orgânica, seis vezes mais fósforo e bases trocáveis que outras (Anexo 3).

Foi possível observar uma forte co-estrutura entre os atributos funcionais, as estratégias ecológicas e a fertilidade do solo com a composição da comunidade estudada ($RV = 0,45$; $p < 0,001$), revelando uma relação significativa entre a composição de espécies e os parâmetros ambientais (Figura 3). O eixo 1 da COIA explica 67,3% dos dados e mostra que enquanto algumas áreas são caracterizadas pela elevada acidez, outras se caracterizam pelos teores de fósforo e matéria orgânica relativamente mais elevados (Figura 3a). Porém, ao contrário do esperado, áreas mais inférteis abrigaram espécies com maior competitividade, com folhas maiores e maior área foliar específica. Enquanto as áreas menos inférteis abrigaram espécies com maior estresse-tolerância, com folhas menores e área foliar específica menor. Algumas espécies, como *Microstachys corniculata*, *T. heteromalla*, *V. tragacantha*, *V. compacta* e *Cattleya caulescens* ocorrem preferencialmente em parcelas com solos relativamente mais ácidos, saturados de alumínio e nutricionalmente mais pobres, com teores baixos de fósforo, matéria orgânica, e bases trocáveis. Por outro lado, *Epidendrum secundum*, *L. pinaster*, *Lippia grata*, *M. calodendron*, *V. albiflora* e *Eriope macrostachya* ocorrem preferencialmente em solos relativamente menos ácidos, porém com maiores teores de fósforo, matéria orgânica e bases trocáveis (Figura 3b). As espécies intermediárias são pouco relacionadas ao eixo 1 da COIA.

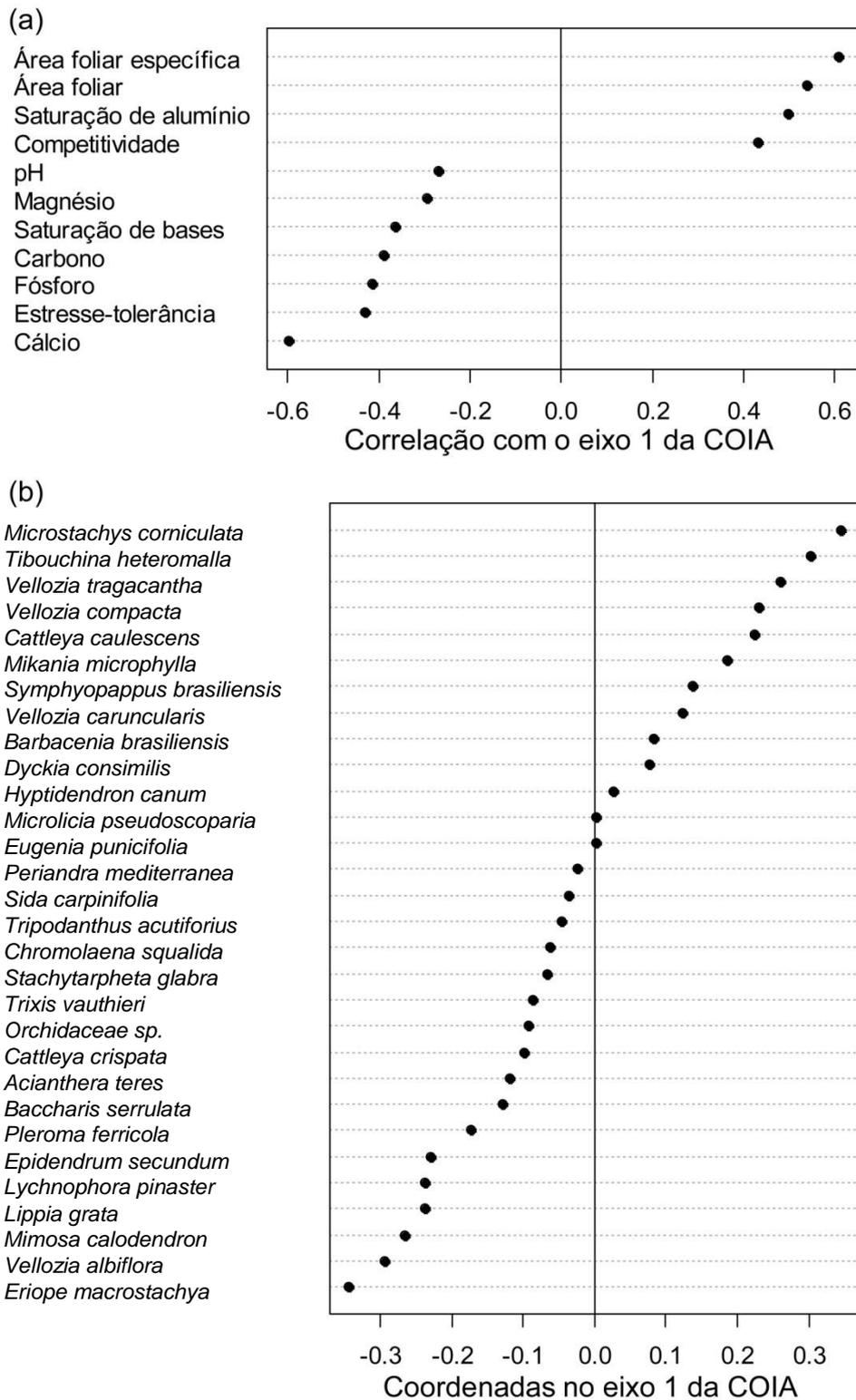


Figura 3 – Relações entre os parâmetros ambientais e a comunidade arbustiva no campo rupestre ferruginoso, Serra do Rola Moça, MG, Brasil. a: Correlação entre os parâmetros ambientais (ponderada pela incidência de plantas em cada área) e as coordenadas das áreas ao longo do eixo 1 da análise de co-inércia. b: Coordenadas das espécies no eixo 1 co-inércia.

DISCUSSÃO

Neste estudo foram avaliadas as características funcionais da vegetação arbustiva dos CRF e a relação entre a comunidade de plantas e a fertilidade do solo e atributos funcionais. Através da avaliação das estratégias ecológicas foi evidenciado que a vegetação arbustiva é fortemente estresse-tolerante e dotada de atributos que a caracterizam como mais conservativa (Wright et al. 2004), como baixa área foliar específica e alto conteúdo de matéria seca foliar. Assim, considerando a baixa fertilidade do solo das áreas estudadas e os fatores que tornam o ambiente extremo para a vida das plantas (Gaff 1987, Schaefer et al. 2015), corroboramos a hipótese de que estas características ambientais favorecem espécies com atributos que maximizam a conservação dos recursos adquiridos (Diaz et al. 2004, Wright et al. 2004). Assim como nos campos rupestres quartzíticos (Negreiros et al. 2014), o estresse ambiental impõe um forte filtro sobre a vegetação dos CRF, levando a uma convergência de estratégias ecológicas. Comparando a vegetação arbustiva dos CRF com a vegetação de outros ecossistemas semelhantes no mundo todo, percebe-se que a vegetação dos CRF é ainda mais estresse-tolerante em relação a estes ecossistemas. Este grau de estresse-tolerância permanece alto mesmo quando comparamos as estratégias CSR dos arbustos do CRF com arbustos de diversos biomas do mundo (veja Pierce et al. 2016).

O solo nas áreas estudadas é altamente ácido, com elevados teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e P^{2+} , a saturação por bases é muito baixa, porém devido a heterogeneidade do relevo, diversas fissuras e pedras acumulam solo e fazem o teor de matéria orgânica ser elevado (Tabela 2). Entretanto nestes substratos intemperizados o fósforo se combina com o ferro e o alumínio formando compostos insolúveis, tornando-se indisponível para as plantas (Carmo e Jacobi 2015). Isto faz com que, mesmo em níveis elevados no solo, o fósforo continue sendo um fator limitante para o crescimento das plantas na região. Mas apesar do solo infértil, desenvolvido numa paisagem antiga, os CRF abrigam uma enorme diversidade (Jacobi e Carmo 2012) e provavelmente a evolução em direção a otimização da captação de recursos do solo é o que propulsiona esta diversidade de plantas (Hooper 2009, Oliveira et al. 2015).

A vegetação que habita este ambiente é, em sua maioria, metalófito tolerando ou acumulando metais nos tecidos (Oliveira et al. 2016). Por exemplo, *Vellozia tragacantha*, *V. albiflora*, *V. caruncularis*, *V. compacta*, *Barbacenia brasiliensis*

(Velloziaceae) e *M. corniculata* (Euphorbiaceae) pertencem a famílias descritas como hiperacumuladoras (Brookes 1998, Reeves et al. 2007). Quando comparados o solo das áreas aqui estudadas, com o solo de CRF em outras áreas algumas diferenças são notáveis. A quantidade de fósforo em algumas áreas de campo rupestre ferruginoso no Parque Estadual do Rola-Moça é 20 vezes maior que nos campos rupestres ferruginosos de Carajás-PA e nos CRF do próprio Quadrilátero Ferrífero, por exemplo (Silveira et al. 2016). Ainda comparando com estes locais, a acidez potencial (H+Al) nas áreas do parque também é maior (o dobro em alguns casos). Já o pH é extremamente baixo (4.3) e se assemelha ao pH destes outros CRF. Isto pode explicar a presença de espécies com um grau de competitividade além do esperado, como *Trixis vauthieri*, *Sida carpinifolia*, *Tibouchina heteromalla* e *Vellozia compacta*. Apesar destas diferenças, a maioria dos parâmetros da análise de solo das áreas do parque é semelhante a outros CRF, representando assim um bom modelo de estudo.

Ao contrário do que esperávamos áreas mais inférteis abrigaram uma vegetação com maior competitividade, com folhas maiores e maior área foliar específica, enquanto áreas menos inférteis abrigaram vegetação mais estresse-tolerante, com folhas menores e área foliar específica menor. Isto significa que as áreas com menor disponibilidade de recursos abrigaram espécies de maior porte, mais capazes de adquirir os recursos do ambiente e alocá-los para seu crescimento. Enquanto áreas com relativamente mais recursos disponíveis abrigaram espécies menores, especialistas em conservar os recursos lentamente adquiridos, alocando-os na manutenção do seu metabolismo. Assim, é possível considerar estas espécies associadas às áreas relativamente mais férteis como ideais para a restauração dos CRF, uma vez que aparentemente elas se desempenham melhor em áreas sob restauração (Pywell et al. 2003). Porém, este padrão aparentemente contraditório indica que não devemos considerar somente o status nutricional em estudos de comunidades vegetais. Negreiros et al. (2014) encontraram uma situação semelhante e sugerem que os parâmetros usados para caracterizar a estrutura do hábitat devem ser selecionados trazendo em consideração características físicas relacionadas com a capacidade de retenção de água. Além do mais, outros fatores ambientais além da fertilidade do solo influenciam as estratégias CSR das plantas (Fujita et al. 2013). No caso da vegetação dos CRF, é provável que assim como nos campos rupestres quartzíticos as variáveis físicas relacionadas à disponibilidade de água (e.g. proporção de solo descoberto, quantidade de solo fino) estejam mais fortemente

associadas às estratégias ecológicas da vegetação (Messias et al. 2013, Negreiros et al. 2014). Sendo o estresse hídrico o filtro mais forte na seleção de espécies estresse-tolerantes.

Em conclusão, este trabalho indica que os CRF têm uma vegetação arbustiva altamente estresse-tolerante, capaz de lidar com os fortes filtros ambientais impostos pelas condições edáficas. Evidenciamos também que áreas com menos matéria orgânica, menos fósforo e menos ácidas abrigaram uma vegetação com maior competitividade, com folhas maiores e maior área foliar específica, enquanto áreas com mais matéria orgânica, mais fósforo e mais ácidas abrigaram vegetação mais estresse-tolerante, com folhas menores e área foliar específica menor. O conhecimento desta associação das espécies com habitats específicos nos campos rupestres ferruginosos é potencialmente importante para a ecologia da restauração e também para os tomadores de decisão. De maneira simples, aqui se pode notar que algumas espécies são potencialmente mais adequadas que outras para restaurar áreas de CRF com diferentes parâmetros ambientais, pois, as espécies se distribuíram na comunidade de acordo com as características do solo e os atributos funcionais de cada área. Conhecendo a ecologia destas espécies evita-se o risco de falhas e desperdício de verbas em projetos de restauração. Acompanhar esta correlação entre os parâmetros ambientais e a composição das comunidades vegetais ao longo do tempo pode trazer ainda mais subsídios para projetos de restauração futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brookes RR (1998) Plants that hyperaccumulate heavy metals, their role in phytoremediation, microbiology, archeology, mineral exploration and phytomining. CAB International, New York

Carmo FF, Jacobi CM (2013) A vegetação de canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: caracterização e contexto fitogeográfico. *Rodriguesia* 64:527-541

Carmo FF, Jacobi CM (2015) Diversity and plant trait-soil relationships among rock outcrops in the Brazilian Atlantic rainforest. *Plant Soil*. doi: 10.1007/s1110401527357

Chai Y, Liu X, Yue M, Guo J, Wang M, Wan P, Zhang X, Zhang C (2015) Leaf traits in dominant species from different secondary successional stages of deciduous forest on the Loess Plateau of northern China. *Applied Vegetation Science* 18:50-63

Chapin III FS, Autumn K, Pugnaire F (1993) Evolution of suites of traits in response to environmental stress. *American Naturalist* 142:S78-S92

- Chapin III FS, Zavaleta ES, Eviner VT, Naylor RL, Vitousek PM, Reynolds HL et al (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405:234-242
- Conselho de Política Ambiental (2009) Lista das species ameaçadas de extinção da flora do Estado de Minas Gerais. COPAM 85:1-97
- de Paula LF, Negreiros D, Azevedo LO, Fernandes RL, Stehmann JR, Silveira FA (2015) Functional ecology as a missing link for conservation of a resource-limited flora in the Atlantic forest. *Biodiversity and Conservation* 24:2239-2253
- Díaz S, Hodgson JG, Thompson K, Cabido M, Cornelissen JHC, Jalili, A, Zak, MR et al (2004) The plant traits that drive ecosystems: evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science* 15:295-304
- Díaz S, Kattge J, Cornelissen JHC, Wright IJ, Lavorel S, Dray S et al (2016) The global spectrum of plant form and function. *Nature* 529:167-171
- Dray S, Chessel D, Thioulouse J (2003) Co-inertia analysis and the linking of ecological data tables. *Ecology* 84:3078-3089
- Dray S, Dufour AB (2007) The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software* 22:1-20
- Dray S, Choler P, Dolédec S, Peres-Neto PR, Thuiller W, Pavoine S, ter Braak CJF (2014) Combining the fourth-corner and the RLQ methods for assessing trait responses to environmental variation. *Ecology* 95:14-21
- Fujita Y, van Bodegom PM, Witte J-PM (2013) Relationships between nutrient-related plant traits and combinations of soil N and P fertility measures. *PLoS ONE* 8:e83735
- Gaff DF (1987) Desiccation tolerant plants in South America. *Oecologia* 74:133-136
- Garnier E, Sthal U, Laporte M-A et al (2016) Towards a thesaurus of plant characteristics: an ecological contribution. *Journal of Ecology*. doi: 10.1111/1365274512698
- Giulietti AM, Rapini A, de Andrade MJG, Queiroz LP, da Silva JMC (2009) Plantas raras do Brasil. Conservation International, Belo Horizonte
- Grime JP (2001) Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties. 2nd edn. Wiley, Chichester
- Grime JP, Pierce S (2012) The evolutionary strategies that shape ecosystems. John Wiley & Sons, Oxford
- Hodgson JG, Hunt WR, Grime JP, Thompson K (1999) Allocating C-S-R plant functional types: a soft approach to a hard problem. *Oikos* 85:282-294
- Hooper SD (2009) OCBIL theory: towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatically buffered, infertile landscapes. *Plant Soil* 322:49-86

- Jacobi CM, Carmo FF, Vincent RC, Stehmann JR (2007) Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodivers Conserv* 16:2185-2200
- Jacobi CM, Carmo FF (2008) The contribution of ironstone outcrops to plant diversity in the Iron Quadrangle, a threatened Brazilian landscape. *AMBIO* 37:324-326
- Jacobi CM, Carmo FF (2012) *Diversidade florística nas cangas do Quadrilátero Ferrífero*. IDM Ltda, Belo Horizonte
- Lambers H, Chapin FS, Pons TL (2008) *Plant physiological ecology*. Springer, New York
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime JP, Hector A et al (2001) Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science* 294:804-808
- Messias MCTB, Leite MGP, Neto JAAM, Kozovits AR, Tavares R (2013) Soil-vegetation relationship in quartzitic and ferruginous brazilian rocky outcrops. *Folia Geobot*. doi:10.1007/s1222401391544
- Mueller-Dombois D, Ellenberg H (1974) *Aims and methods in vegetation ecology*. John Wiley & Sons, New York
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853–858
- Negreiros D, Le Stradic S, Fernandes GW, Rennó HC (2014) CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. *Plant Ecology* 215:379-388
- Oliveira RS, Galvão HC, de Campo MCR, Eller CB, Pearse SJ, Lambers H (2015) Mineral nutrition of campos rupestres plant species on contrasting nutrient-impooverished soil types. *New Phytologist* 205:1183-1194
- Oliveira RS, Abrahão A, Pereira C, Teodoro GS, Brum M, Alcantara S, Lambers H (2016) Ecophysiology of campos rupestres plants. In: Fernandes GW (ed) *Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil*, 1st edn. Springer, Switzerland, pp 227-262
- Pavoine S, Vela E, Gachet S, De Bélair G, Bonsall MB (2011) Linking patterns in phylogeny, traits, abiotic variables and space: a novel approach to linking environmental filtering and plant community assembly. *Journal of Ecology* 99:165-175
- Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte MS et al (2013) New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61:167–234
- Pierce S, Luzzaro A, Caccianiga M, Ceriani RM, Cerabolini B (2007) Disturbance is the principal a-scale filter determining niche differentiation, coexistence and biodiversity in an alpine community. *Journal of Ecology* 95:698-706

Pierce S, Brusa G, Vagge I, Cerabolini BEL (2013) Allocating CSR plant functional types: the use of leaf economics and size traits to classify woody and herbaceous vascular plants. *Functional Ecology* 27:1002-1010

Pierce S, Negreiros D, Cerabolini BEL et al (2016) A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes worldwide. *Functional Ecology*. doi:10.1111/1365243512722

Pywell RF, Bullock JM, Roy DB, Warman L, Walker KJ, Rothery P (2003) Plant traits as predictors of performance in ecological restoration. *Journal of Applied Ecology* 40:65-77

R Development Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>

Reeves RD, Baker AJM, Becquer T, Echevarria G, Miranda ZJG (2007) The flora and biogeochemistry of the ultramorphic soils of Goiás state, Brazil. *Plant Soil* 93:107-119

Rizzini CT (1979) *Tratado de Fitogeografia do Brasil*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo

Schaefer CE, Cândido HG, Corrêa GR, Pereira A, Nunes JÁ, Souza OF, Marins A, Filho EF, Ker JC (2015) Solos desenvolvidos sobre canga ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. In: Carmo FF, Kamino LHY (ed) *Geossistemas ferruginosos do Brasil*. 3i, Belo Horizonte, pp77-102

Silveira FAO, Negreiros D, Barbosa NPU, Buisson E, Carmo FF, Carstensen DW, et al (2016) Ecology and evolution of the endangered campo rupestre: a neglected biodiversity conservation priority. *Plant & Soil* 403:129-152

Skirycz A, Castilho A, Chaparro C, Carvalho N, Tzotzos G, Siqueira JO (2014) Canga biodiversity, a matter of mining. *Frontiers in Plant Science*. doi:10.3389/fpls201400653

Violle C, Navas ML, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E (2007) Let the concept of trait be functional!. *Oikos* 116:882-892

Wright IJ, Reich PB, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F et al (2004) The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* 428:821-82

ANEXOS

Anexo 1 – Lista de espécies usadas no presente estudo encontradas nos campos rupestres ferruginosos do Parque Estadual Serra do Rola-Moça, MG, Brasil.

Tabela 1 – Espécies arbustivas encontradas no Campo Rupestre Ferruginoso. **EE** = Espécie endêmica; **SC** = Status de conservação (Lista das Espécies Ameaçadas de Extinção do Estado de Minas Gerais); **VU** = Vulnerável.

Família	Espécie	Distribuição Geográfica	EE	SC
Asteraceae	<i>Baccharis serrulata</i> (Lam.) Pers.	Brasil	*	
	<i>Chromolaena squalida</i> (DC.) R.M.King & H.Rob.	Brasil		
	<i>Lychnophora pinaster</i> Mart.	Campo Rupestre	*	VU
	<i>Mikania microphylla</i> Sch. Bip.	Campo Rupestre	*	
	<i>Symphypappus brasiliensis</i> (Gardner) R.M. King & H. Rob	Campo Rupestre	*	
	<i>Trixis vauthiere</i> DC.	Brasil	*	
Bromeliaceae	<i>Dyckia consimilis</i> Mez	Campo Rupestre	*	
	<i>Microstachys corniculata</i> (Vahl) A. Juss. ex Griseb	Brasil		
Euphorbiaceae				
Fabaceae	<i>Mimosa calodendron</i> Mart. ex Benth.	Quadrilátero Ferrífero	*	
	<i>Periandra mediterranea</i> (Vell.) Taub.	Brasil		
Lamiaceae	<i>Eriope macrostachya</i> Mart. ex Benth.	Brasil		
Loranthaceae	<i>Hyptidendron canum</i> (Pohl ex Benth.) Harley	Brasil		
	<i>Tripodanthus acutifolius</i> (Ruiz & Pav.) Tiegh.	Brasil		
Malvaceae	<i>Sida carpinifolia</i> Mill.			
Melastomataceae	<i>Tibouchina heteromalla</i> (D.Don) Cogn.	Brasil	*	
	<i>Pleroma ferricola</i> A.L.F.Oliveira, R.Romero & P.J.F.Guim.	Quadrilátero Ferrífero	*	
	<i>Microlicia pseudoscoparia</i> Cogn.	Campo Rupestre	*	
Myrtaceae	<i>Eugenia puniceifolia</i> (Kunth) DC.	Brasil	*	
Orchidaceae	<i>Acianthera teres</i> (Lindl.) Borba	Campo Rupestre e Inselberg	*	
	<i>Cattleya caulescens</i> (Lindl.) Van den Berg	Campo Rupestre	*	
	<i>Cattleya crispata</i> (Thunb.) Van den Berg	Brasil	*	
	<i>Epidendrum secundum</i> Jacq. <i>Orchidaceae</i> sp.	Brasil		
Velloziaceae	<i>Barbacenia brasiliensis</i> Willd.	Campo Rupestre	*	
	<i>Vellozia caruncularis</i> Mart. ex Seub	Campo Rupestre	*	
	<i>Vellozia compacta</i> Mart. ex Schult. f.	Campo Rupestre	*	
	<i>Vellozia albiflora</i> Pohl	Campo Rupestre	*	
	<i>Vellozia tragacantha</i> (Mart. ex Schult. f.) Mart. ex Seub	Campo Rupestre	*	
Verbenaceae	<i>Lippia grata</i> Schauer	Brasil	*	
	<i>Stachytarpheta glabra</i> Cham.	Campo Rupestre	*	

Anexo 2 – Atributos funcionais das 30 espécies amostradas em vegetação de campo rupestre ferruginoso na Serra do Rola-Moça, MG, Brasil.

Tabela 2 – Os valores se referem a média de seis réplicas por espécie. Categoria CSR: categorias de estratégia de acordo com Hodgson et al. (1999); C: competitividade (%), S: Estresse-tolerância (%), R: Ruderalidade (%) de acordo com o StrateFy (Pierce et al. 2016); LA: Área foliar (mm); SLA: Área foliar específica (mm² mg⁻¹); LDMC: Conteúdo de matéria seca foliar.

Espécies	Categoria CSR	C	S	R	LA	SLA	LDMC
<i>Baccharis serrulata</i>	S	15,3	84,7	0	341,0	7,0	36,9
<i>Chromolaena squalida</i>	S	1,9	98,1	0	42,9	4,4	40,4
<i>Lychnophora pinaster</i>	S	0	100	0	15,7	2,8	44,8
<i>Mikania microphylla</i>	S	3,6	96,4	0	63,4	6,1	38,2
<i>Symphypappus brasiliensis</i>	S	7,8	92,2	0	146,9	3,8	40,1
<i>Trixis vauthiere</i>	S/CS	27,1	72,9	0	779,9	7,0	31,9
<i>Dyckia consimilis</i>	S	3,7	96,3	0	135,9	1,8	19,8
<i>Microstachys corniculata</i>	S	4,2	95,8	0	65,0	5,8	37,0
<i>Mimosa calodendron</i>	S	9,4	90,6	0	260,1	2,3	51,5
<i>Periandra mediterranea</i>	S	9,2	90,8	0	233,0	2,6	47,0
<i>Eriope macrostachya</i>	S	8,3	91,7	0	263,0	4,8	28,3
<i>Hyptidendron canum</i>	S	11,3	88,7	0	622,6	4,9	26,2
<i>Tripodanthus acutifolius</i>	S	14,8	85,2	0	557,4	2,1	49,6
<i>Sida carpinifolia</i>	S/CS	15,1	84,9	0	348,2	5,7	36,2
<i>Tibouchina heteromalla</i>	S/CS	20,0	80,0	0	1937,7	4,1	28,0
<i>Pleroma ferricola</i>	S	8,0	92,0	0	175,7	3,6	36,6
<i>Microlicia pseudoscoparia</i>	S	0	100	0	2,4	3,5	9,7
<i>Eugenia punicifolia</i>	S	6,7	93,3	0	156,1	3,4	49,0
<i>Acianthera teres</i>	S	4,5	95,5	0	199,3	1,0	11,9
<i>Cattleya caulescens</i>	S	6,7	93,3	0	328,2	1,5	15,0
<i>Cattleya crispata</i>	S	9,0	91,0	0	540,0	1,5	15,0
<i>Epidendrum secundum</i>	S	8,2	91,8	0	534,2	2,5	10,2
<i>Orchidaceae sp.</i>	S	13,7	86,3	0	1146,7	1,5	15,2

<i>Barbacenia brasiliensis</i>	S	13,9	86,1	0	308,6	5,0	36,9
<i>Vellozia caruncularis</i>	S	12,8	87,2	0	313,0	3,7	41,2
<i>Vellozia compacta</i>	S/CS	19,6	80,4	0	910,2	3,0	42,8
<i>Vellozia albiflora</i>	S	10,4	89,6	0	274,2	2,9	46,8
<i>Vellozia tragacantha</i>	S	3,5	96,5	0	73,5	3,2	47,2
<i>Lippia grata</i>	S	6,7	93,3	0	124,4	3,6	43,0
<i>Stachytarpheta glabra</i>	S	6,9	93,1	0	282,8	5,1	25,3

Anexo 3 – Resultados da análise do solo de áreas da Serra do Rola-Moça, MG, Brasil.

Tabela 3 – Análise química de solo. Os valores representam a média de todas as 52 parcelas mais ou menos o desvio padrão. SB: Soma de bases; C: Carbono orgânico total; CTC: capacidade de troca catiônica.

Parâmetros	Valores
pH (H ₂ O)	4,3 ± 0,2
P (mg/dm ³)	24,0 ± 9,9
K (cmol _c /dm ³)	0,25 ± 0,24
Ca (cmol _c /dm ³)	2,1 ± 1,0
Mg (cmol _c /dm ³)	0,8 ± 0,4
Al (cmol _c /dm ³)	0,7 ± 0,2
H+Al (cmol _c /dm ³)	25,8 ± 7,1
SB (%)	3,2 ± 0,9
C (dag/kg)	17,6 ± 5,6
CTC (cmol _c /dm ³)	29,0 ± 6,8