

AMPLIANDO O CONHECIMENTO NAS RELAÇÕES FOLHA-DOSEL DE CAFEIROS ATRAVÉS DA ASSOCIAÇÃO DE TROCAS GASOSAS E ÍNDICE DE VEGETAÇÃO^{1,2,3,4}

Larissa Cocato da Silva⁵; Mário Pereira da Silva Filho⁶; Ane Marcela das Chagas Mendonça⁷; Fernanda Aparecida Aguiar⁸; Jean Marcel Sousa Lira⁹; Vicente Luiz Naves¹⁰; Serge Rambal¹¹; João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa¹²

¹Trabalho financiado pela Cooperação bilateral CNPq-IRD

²Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – Consórcio Pesquisa Café

³Trabalho financiado pela FAPEMIG

⁴Área experimental cedida pelo Núcleo de Estudos em Cafeicultura da UFLA (NECAFE)

⁵Bolsista Pibic/FAPEMIG, Graduanda, lari.cocato@hotmail.com

⁶Bolsista Consórcio Pesquisa Café, Graduando, mario_pfilho@hotmail.com

⁷Bolsista Doutorado/CNPq, Msc, anemarcela@hotmail.com

⁸Bolsista Pibic/FAPEMIG, Graduanda, faguiar.ufla@hotmail.com

⁹Bolsista Pós-doutorado/CAPEB-FAPEMIG, Dsc, jmslira@hotmail.com

¹⁰Bolsista Doutorado/CNPq, Msc, naves.agro@hotmail.com

¹¹Pesquisador Sênior Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, PhD, serge.rambal@cefe.cnrs.fr

¹²Professor adjunto da UFLA, Dsc, jp.barbosa@dbi.ufla.br

RESUMO: A associação de técnicas de sensoriamento remoto a avaliações fisiológicas de folhas é uma alternativa para estudar impactos das variações climáticas nos fluxos de carbono e de água nos cafezais, bem como a forma com que esses impactos se propagam da folha para a planta toda, afetando a produção. Objetivou-se correlacionar séries temporais de trocas gasosas foliares e de NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), a fim de verificar a associação entre processos fisiológicos foliares e processos funcionais do dossel, respectivamente, contribuindo para ampliar o conhecimento entre as relações folha-dossel em *Coffea arabica* L cv. Catuaí IAC 144 com 6 anos de idade. As medidas de NDVI e trocas gasosas foram realizadas mensalmente de fevereiro de 2014 a fevereiro de 2015 em 30 indivíduos cultivados em espaçamento 0,80 x 4,0m. As medições de NDVI foram realizadas em três posições distintas: topo da copa: (NDVI_t); e faces nordeste (NDVI_n) e sudoeste (NDVI_s) através do sensor manual GreenSeeker (Trimble, USA). Dados mensais de precipitação (mm- Prec) e a temperatura média do ar (°C- T_m) foram obtidos diariamente da estação climatológica principal de Lavras (INMET). As características foliares relacionadas às trocas gasosas (Fotossíntese líquida -A, Transpiração - E e Condutância estomática - gs), foram avaliadas com o auxílio de um sistema portátil de medida de trocas gasosas por infravermelho (IRGA Li 6400 XT – LICOR, USA) em 3 folhas do terço médio e do terço superior, nas faces nordeste e sudoeste. Os resultados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey (P<0,05). Para quantificar as forças de interação entre características avaliadas na folha e no dossel utilizaram-se os valores z de conectância. Em geral, os dados de NDVI do topo da planta apresentaram menor variação em relação às medidas laterais ao longo do tempo. Os valores de NDVI reduziram nos meses de maio a novembro de 2014, o que pode estar relacionada à redução do volume de folhas ocasionado pela diminuição da precipitação e baixas temperaturas neste período. Com relação às trocas gasosas, vale destacar que não houve diferença significativa para as características avaliadas entre faces da planta. Em relação aos valores de conectância entre as séries temporais das variáveis avaliadas, observou-se elevados valores z entre o NDVI, independente da posição na copa e a fotossíntese, indicando que a variação temporal da fotossíntese foliar modula os padrões temporais de funcionamento da copa do cafeeiro arábica. Esses resultados indicam que o funcionamento do dossel do cafeeiro é bastante conectado aos processos fisiológicos foliares, e esses são mediados especialmente pela precipitação. Portanto, medidas de NDVI podem ser realizadas para se acessar o estado fisiológico de cafeeiros no Sul de Minas Gerais, de forma rápida, de baixo custo e pouco invasiva.

PALAVRAS-CHAVE: Fotossíntese, Eficiência do uso da água, NDVI, mudança de escala.

WIDENING THE KNOWLEDGE ON LEAF-TO-CANOPY COUPLING IN COFFEE THROUGH GAS EXCHANGE AND VEGETATION INDEX

ABSTRACT: The association of remote sensing techniques to leaf physiological evaluations is an interesting alternative to assess the impacts of climate changes in carbon fluxes and water in coffee plantations as well as the way they impact the whole plant, affecting production. The objective was to correlate time series of leaf gas exchange and NDVI (normalized difference of vegetation index) in order to verify the coupling between leaf and canopy processes in *Coffea arabica* L cv. Catuaí IAC 144 with 6 years of age. The NDVI and gas exchange measurements were taken monthly from February 2014 to February 2015 in 30 plants grown in 0.80 x 4.0 m spacing. NDVI measurements were performed at three different positions: top of the crown: (NDVI_t); and faces northeast (NDVI_n) and southwest (NDVI_s) through the manual sensor GreenSeeker (Trimble, USA). Monthly precipitation data (PREC-mm) and the average air

temperature (T_m - °C) were obtained daily from the main meteorological station of Lavras (INMET). The leaf traits related to gas exchange (net photosynthesis A, Transpiration E and stomatal conductance gs), were evaluated with a portable infrared gas exchange system (IRGA Li 6400 XT - LiCOR, USA) in 3 leaves of two portions of the canopy (middle and upper third) in faces northeast and southwest. The results were submitted to analysis of variance and means were compared by Tukey test ($P < 0.05$). To quantify the forces of interaction between leaf and canopy characteristics we used the connectance z values. In general, NDVI the top of the plant showed less variation when compared to other measures over time. The NDVI values from May to November 2014 were lower. The decrease of NDVI may be related to reduced leaf volume caused by the decrease precipitation and low temperatures in this period. With respect to gas exchange, it is noteworthy that there was no significant difference for the evaluated characteristics of the plant faces and positions. Regarding z values between the time series, there was high connectances between A and NDVI, regardless of the position in the canopy, indicating that the temporal variation of leaf photosynthesis modulates the temporal patterns of coffee canopy. These results indicate that the coffee canopy is very connected to the leaf physiological processes, and these are mediated especially by rainfall. So NDVI measurements can be taken to access the physiological state of coffee in the south of Minas Gerais, in a fast, low cost and minimally invasive way.

KEYWORDS: Photosynthesis, Water use efficiency, NDVI, scaling processes.

INTRODUÇÃO

Estudar os fluxos de carbono e de água nos cafezais, associando a temporalidade do funcionamento da folha e da copa em relação às variações climáticas, é fundamental para compreender a rede de impactos que condições ambientais desencadeiam, bem como a forma com que esses impactos se propagam da folha para a planta toda, fisiologicamente, afetando a produção. Tal informação tem importância para inovações tecnológicas de manejo da lavoura, para programas de melhoramento genético como uma ferramenta de seleção precoce, para a agricultura de precisão e para políticas agrícolas por aprimorar o monitoramento de lavouras e as previsões de safra. Uma alternativa para estudar como condições ambientais afetam os fluxos de carbono em diferentes escalas espaço (da folha ao dossel) – temporais (de meses a anos) é a associação de técnicas de sensoriamento remoto com avaliações fisiológicas de folhas. Sims e Gamon, 2002; Rambal et al., 2003; Asner et al., 2004; Barbosa et al., 2012. As respostas fisiológicas no nível foliar geralmente conduzem a modificações das suas propriedades ópticas e culminam com alterações nos padrões de reflectância dos dosséis. Por sua vez, alterações nos padrões da resposta espectral podem ser estudadas por técnicas de sensoriamento remoto e utilizadas para monitorar o funcionamento, bem como derivar índices que descrevam a sensibilidade da vegetação a variações ambientais, como o NDVI (do inglês – índice de vegetação por diferença normalizada) Blackburn, 2007; Yang et al., 2007. Por estar altamente relacionado aos aspectos biofísicos das plantas, o NDVI tem sido utilizado como ferramenta muito útil e precisa; de baixo custo, para o monitoramento do vigor da vegetação, especialmente por possibilitar a obtenção de séries temporais que correspondem ao comportamento da vegetação às variações ambientais. Séries temporais do NDVI têm sido utilizadas para detectar atividades sazonais e fenológicas, duração do período de crescimento, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência em diversas culturas. Ponzoni, 2007; mas ainda com relatos escassos para cafeeiro arábica. A execução deste tipo de estudo ainda possui limitações em função de dificuldades em interligar respostas observadas nos diferentes níveis hierárquicos e que encerram diferenças temporais. Baseando-se nessas premissas, o objetivo foi obter séries temporais que refletissem a variações de trocas gasosas foliares associadas a variações de NDVI em escala mensal, a fim de verificar a associação entre processos fisiológicos foliares e processos funcionais da copa inteira, contribuindo para ampliar o conhecimento entre as relações folha-dossel do cafeeiro arábica.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em cafezal no campus da UFPA, pertencente ao setor de cafeicultura do Departamento de Agricultura. As atividades de análise de dados foram conduzidas no Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Funcionamento de Ecossistemas (LEFE) da Universidade Federal de Lavras (UFPA). As medidas de NDVI e trocas gasosas foram realizadas mensalmente de fevereiro de 2014 a fevereiro de 2015 em 30 indivíduos de *Coffea arabica* L cv. Caturba IAC 144 com 6 anos de idade, cultivados em espaçamento 0,80m entre plantas e 4,0m entre linhas. As medições de NDVI foram realizadas em três posições distintas: topo da copa: (NDVI_t); e faces nordeste (NDVI_n) e sudoeste (NDVI_s) através do sensor manual GreenSeeker (Trimble, USA). Dados mensais de precipitação (mm- Prec) e a temperatura média do ar (°C- T_m) foram obtidos diariamente da estação climatológica principal de Lavras, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As características foliares relacionadas às trocas gasosas (Fotossíntese líquida -A, Transpiração - E e Condutância estomática - gs), foram avaliadas com o auxílio de um sistema portátil de medida de trocas gasosas por infravermelho (IRGA Li 6400 XT – LiCOR, USA) em 3 folhas do terço médio, nas faces nordeste e sudoeste e em 3 folhas no terço superior, nas faces nordeste e sudoeste, totalizando 12 folhas maduras por planta (total de 360 folhas), expandidas e sem vestígios de injúrias por pragas ou patógenos. As avaliações foram realizadas no horário das 09-10hs, em dias típicos, sem cobertura por nuvens. A densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativa da câmara de medição foi ajustada para 1000 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. A Eficiência de uso da água – EUA

foi obtida pela relação entre A e E. Os resultados de cada característica medida/calculada foram analisados por meio de análise de variância e as médias analisadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Adicionalmente, os dados foram submetidos a uma análise sistêmica, buscando-se quantificar as forças de interação entre características avaliadas na folha e no dossel. Para isso foi realizada análise de correlação (r) e as interações entre variáveis foram analisadas por meio dos valores de r transformados para z , sendo essa uma medida da força de conexão entre as variáveis de trocas gasosas (folha) e NDVI (dossel) e dessas com as variáveis ambientais. Quanto maiores valores de z , maior a força de conexão entre as variáveis, indicando que a alteração de uma está modula a variação da outra. Souza et al., 2009; Bertolli et al., 2013.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de NDVI variaram em função da posição da planta e da época da medida (Figura 1). Foram observados nas séries temporais de NDVI maiores valores no topo das plantas em relação às faces nordeste e sudoeste de julho a outubro de 2014 ($P < 0,05$). Em geral, os dados de NDVI do topo da planta apresentaram menor variação em relação às medidas laterais ao longo do tempo. Os valores de NDVI reduziram nos meses de maio a novembro de 2014, com diferenças significativas ($P < 0,05$) para os meses de agosto a novembro de 2014. A redução do NDVI pode estar relacionada à redução do volume de folhas ocasionado pela diminuição da precipitação e baixas temperaturas neste período (Figura 2), seguindo a desfolha provocada pela colheita no final de abril de 2014 e por elevada incidência de ferrugem em junho e julho de 2014. No entanto, os valores menores de NDVI nos meses de outubro e novembro podem ser atribuídos apenas à diminuição da precipitação e ao ataque de ferrugem, já que, as temperaturas foram favoráveis ao crescimento vegetativo do cafeeiro. Vale destacar que, mesmo essa redução não afetou o estado vegetativo geral do cafezal, considerando que os valores médios de NDVI estiveram acima de 0,60; indicado por Asner et al., (2004), como sendo o valor limite mínimo para que a vegetação apresente em bom estado fisiológico.

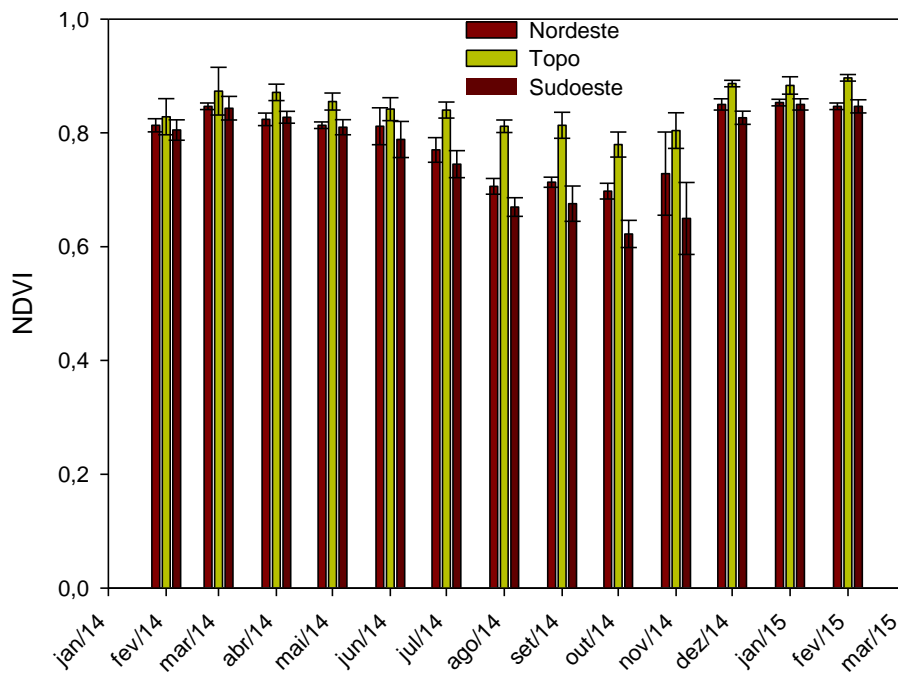


Figura 1. Valores médios de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes posições da copa dos cafeeiros observados de fevereiro de 2014 a fevereiro de 2015: topo da copa (verde) e faces nordeste (vermelho) e sudoeste (marrom). As barras de erro representam o desvio padrão da média ($n = 120 - 30$ plantas avaliadas quatro vezes ao mês).

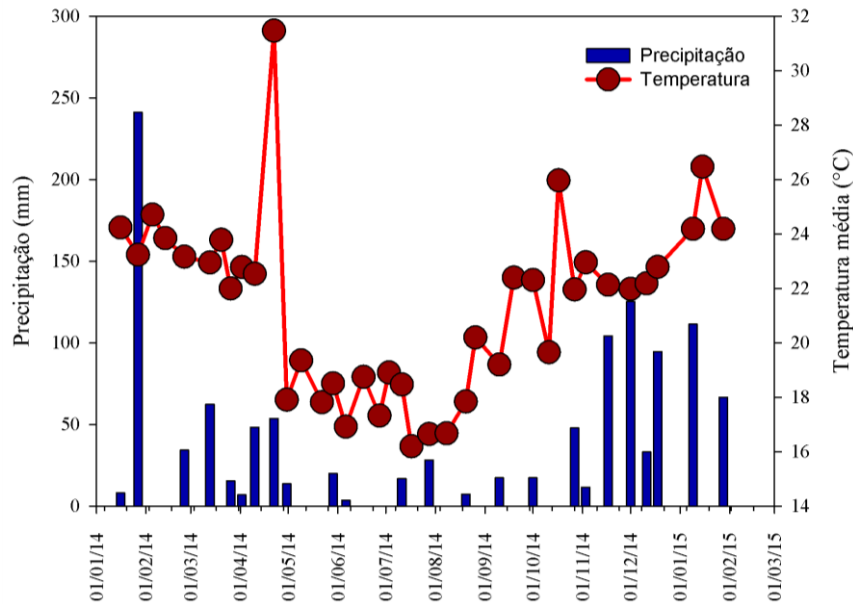


Figura 2. Valores médios mensais de precipitação e temperatura ao longo do período observacional.

Com relação às trocas gasosas, vale destacar que não houve diferença significativa para as características avaliadas entre faces da planta e entre posições na copa, indicando potencial fotossintético semelhante entre as folhas quando expostas a intensidade de radiação fotossinteticamente ativa semelhante. Para a variação temporal das características de trocas gasosas (Figura 3), observaram-se diferenças significativas entre os meses de avaliação para a fotossíntese. O mês de abril de 2014 apresentou maiores valores quando comparado aos meses de fevereiro, junho, julho, agosto, outubro, novembro, dezembro de 2014 e janeiro de 2015. Esse pico de fotossíntese em abril, acompanhado por picos das outras variáveis de trocas gasosas, pode estar associado com as altas temperaturas registradas nesse mês (Figura 2), o que também causou a redução na eficiência de uso da água. O NDVI não apresentou aumento significativo em abril de 2014 como um efeito da elevada temperatura, mas acompanhou a redução da fotossíntese registrada nos meses de maio a novembro de 2014. Já o aumento da fotossíntese em fevereiro de 2015 pode estar associado com o aumento da disponibilidade de água no solo após o período de seca prolongada observada em 2014, em associação a temperaturas amenas.

A transpiração observada em abril de 2014 apresentou diferenças significativas, sendo que seus valores foram maiores quando comparado aos meses de fevereiro, maio, junho, julho, agosto, novembro e dezembro de 2014. Na condutância estomática o mês de abril de 2014 apresentou diferenças significativas, sendo que seus valores foram maiores quando comparado aos meses de fevereiro de 2014, outubro, dezembro, junho, julho, agosto e janeiro de 2015. Com relação à eficiência do uso da água, os meses de junho e julho apresentaram maiores valores quando comparados aos meses de abril, outubro, novembro, dezembro, janeiro de 2015 e fevereiro de 2015. Tal ajuste temporal das trocas gasosas indica a elevada capacidade de ajuste fisiológico (plasticidade fenotípica) em função das variações ambientais do cafeeiro, como indicado por diversos pesquisadores (Camargo, 2010; Lin, 2007; Kumar e Tieszen, 1976).

Em relação aos valores de conectância entre as séries temporais das variáveis avaliadas, observou-se elevados valores z entre o NDVI, independentemente da posição na copa, e a fotossíntese (Tabela 1), indicando que a variação temporal da fotossíntese foliar modula os padrões temporais de funcionamento da copa do cafeeiro arábica. Por outro lado, a eficiência do uso da água não modulou fortemente o comportamento funcional do dossel do cafeeiro, o que é evidenciado pelos baixos valores z . Os padrões temporais da EUA estiveram mais relacionados às variações de temperatura média, que por sua vez não modula as demais variáveis de trocas gasosas e do NDVI de forma intensa. Semelhantemente, a precipitação também não modulou as respostas de folha ou de dossel. Finalmente, observou-se elevada conexão entre os padrões temporais de NDVI observados nas diferentes posições do dossel. Em geral, os valores de z observados entre NDVI e variáveis de trocas gasosas A, gs e E foi de 0,440 para as faces nordeste e sudeste e de 0,478 para as medidas realizadas no topo do dossel. Para as relações de temperatura e precipitação com as séries temporais de NDVI, os valores globais de z foram, respectivamente, 0,238 e 0,211, e com as variáveis de trocas gasosas foram de 0,245 e 0,330, respectivamente.

Esses resultados indicam, em geral, que a fotossíntese foliar modula o funcionamento da copa e que a precipitação é mais limitante que a temperatura para o bom estado fisiológico da planta, considerando diferentes níveis hierárquicos. É evidente que o índice de área foliar deve ser considerado para a melhor integração folha-dossel utilizando essa abordagem, mas o emprego de séries temporais de NDVI pode se caracterizar como uma boa alternativa para acessar aspectos fisiológicos afetando o comportamento do cafeeiro ao longo do tempo, especialmente em condições de variações climático-ambientais.

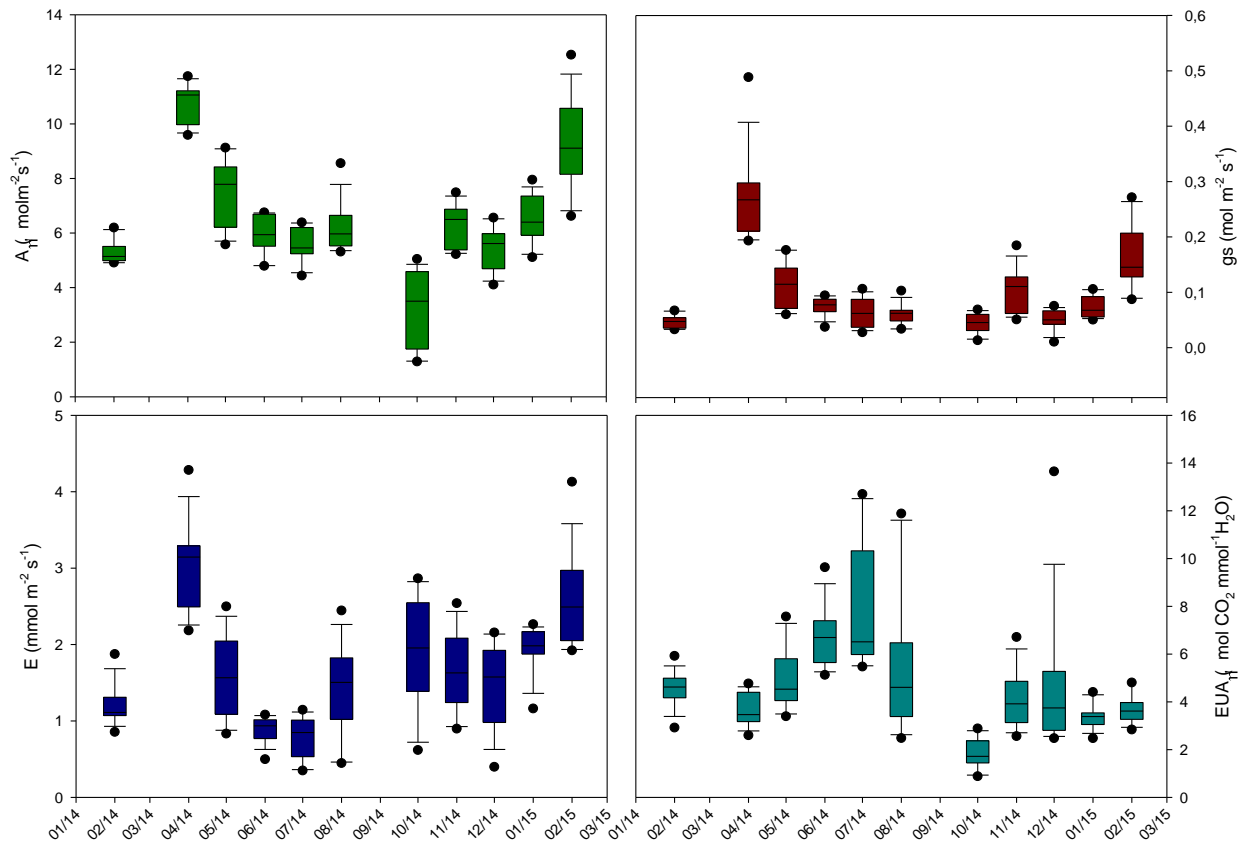


Figura 3. Box-plots representando dados observados de fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência do uso da água (EUA) para cafeeiros no período de fevereiro de 2014 a fevereiro de 2015. As barras representam a distribuição de dados entre os 25° e 75° percentis, as barras de erro compreendem os 5° e 95° percentis, a linha horizontal na barra representa a mediana e os círculos os valores espúrios (n=360).

Tabela 1. Valores z para as séries temporais das variáveis estudadas: A – fotossíntese líquida; gs – condutância estomática; E – transpiração; EUA – eficiência do uso da água; NDVI_{in} – índice de vegetação por diferença normalizada na face nordeste do dossel; NDVI_{it} – índice de vegetação por diferença normalizada no topo do dossel; NDVI_s - índice de vegetação por diferença normalizada na face sudeste do dossel; T_m – Temperatura média e Prec – Precipitação mensal.

	A	gs	E	EUA	NDVI _{in}	NDVI _{it}	NDVI _s
NDVI_{in}	0,625	0,436	0,307	0,017			
NDVI_{it}	0,746	0,477	0,385	0,050	1,635		
NDVI_s	0,672	0,440	0,284	0,082	2,403	1,616	
T_m	0,011	0,009	0,477	0,972	0,330	0,236	0,238
Prec	0,257	0,288	0,438	0,371	0,211	0,326	0,078

CONCLUSÕES

O funcionamento do dossel do cafeeiro é bastante conectado aos processos fisiológicos foliares, e esses são mediados especialmente pela precipitação. Portanto, medidas de NDVI podem ser realizadas para se acessar o estado fisiológico de cafeeiros no Sul de Minas Gerais, de forma rápida, de baixo custo e pouco invasiva. Isso pode ser importante para manejo da lavoura e em programa de melhoramento genético. Finalmente, tal abordagem apresenta limitações que precisam ser mais bem esclarecidas através de refinamento das análises e a associação com a água disponível no solo, ao invés de precipitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASNER, G. P.; TOWNSEND, A. R.; BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, G. B.; OLANDER, L. P. Pasture degradation in the central Amazon: linking changes in carbon and nutrient cycling with remote sensing. *Global Change Biology* 10, p. 844 - 862; 2004.

- BARBOSA, J.P.R.A.D.B.; RAMBAL, S.; SOARES, A.M.; MOUILLOT., F.; NOGUEIRA, J.M.P.; MARTINS, G.A.M. Plant physiological ecology and the global changes. *Ciência e Agrotecnologia*, v.36, p. 253-269; 2012.
- BERTOLLI, S. C.; VÍTOLO, H. F.; SOUZA, G. M. Network Connectance Analysis as a Tool to Understand Homeostasis of Plants under Environmental Changes. *Plants*, v. 2, p. 473-488, 2013.
- BLACKBURN, G.A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, v. 58, n. 4, p. 855–867, 2007.
- CAMARGO, M B P de. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia*, Campinas, v. 69, n. 1, 2010.
- KUMAR, D.; TIESZEN, L.L. Some aspects of photosynthesis and related processes in *Coffea arabica* L. *Kenya Coffee* 41, 309–315. 1976.
- LIN, B. B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*.144, p. 85–94. 2007.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação (p. 127). São José dos Campos: Parêntese. (2007).
- RAMBAL, S.; OURCIVAL, J. M.; JOFFRE, R.; MOUILLOT, F.; NOUVELLON, Y.; REICHSTEIN, M.; ROCHETEAU, A. Drought controls over conductance and assimilation of a Mediterranean evergreen ecosystem: scaling from leaf to canopy. *Global Change Biology* 9, p. 1813 - 1824; 2003.
- SIMS D.A.; GAMON, J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81, p. 337– 354. 2002.
- SOUZA, G. M.; RIBEIRO, R.; PRADO, C. H. B. S.; DAMINELI, D. S. C.; SATO, A. M.; OLIVEIRA, M. S. Using network connectance and autonomy analyses to uncover patterns of photosynthetic responses in tropical woody species. *Ecological Complexity*, v. 6, p. 15-26, 2009.
- YANG, C.M.; LEE, Y.J.; HONG, K.Y.; HSU, F.H. Estimation of Forage Production of Nilegrass Using Vegetation Reflectance. *Crop Science*, v. 47, July August 2007.