

RESISTÊNCIA E RESILIÊNCIA DOS CAFEZAIS DO SUL DE MINAS GERAIS AO DEFICIT HÍDRICO: UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO¹

Daniela Andrade², Joana Messias Pereira Nogueira³, Guilherme Leite Nunes Coelho⁴, Jéssica Putini Luiz Campos⁴, João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa⁵, Ângela Maria Soares⁵

¹ Financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)

² Graduanda em Agronomia, bolsista de Iniciação Científica CNPq, UFLA-MG, daniela.agronomia@hotmail.com

³ Graduanda em Ciências Biológicas, bolsista de Iniciação Científica CNPq, UFLA-MG, joana@cbiologicas.ufla.br

⁴ Graduando em Ciências Biológicas, UFLA-MG, guilherme_inc02@hotmail.com, jessybiology@gmail.com

⁵ Professor Dr. da Universidade Federal de Lavras-UFLA, Lavras, MG, jp.barbosa@dbi.ufla.br, amsoares@dbi.ufla.br

RESUMO: O conhecimento sobre características funcionais de cafezais (resistência, resiliência, entre outros) à duração e à intensidade da seca é de importância estratégica, uma vez que alguns trabalhos apontam inaptidão para a cafeicultura em regiões atualmente produtoras em face do aquecimento global. Nessa perspectiva, objetivou-se acessar a resistência e a resiliência de cafezais ao déficit hídrico através dos seguintes índices de vegetação: *Land Surface Water Index* (LSWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI), obtidos por técnicas de sensoriamento remoto na região Sul de Minas Gerais. Os índices de vegetação foram obtidos de imagens do sensor MODIS referentes ao período entre 2003 a 2010. LSWI foi utilizado para definir a duração e a intensidade do déficit hídrico, e NDVI e EVI para avaliar as respostas de resiliência e resistência de cafezais frente à deficiência hídrica. Verificou-se que os anos de 2003 e 2010 foram os de seca mais intensa e duradoura, de acordo com o índice LSWI. Os índices NDVI e EVI apontaram o ano de 2009 com os menores valores de resiliência e as maiores resistências dos cafezais à deficiência hídrica. Essas informações podem ser empregadas na definição de valores críticos da intensidade e duração do déficit hídrico e como parâmetros de monitoramento fisiológico de cafezais, fornecendo informações para previsões de impactos potenciais em cenários futuros e na definição de ações estratégicas de manejo da cultura em condições ambientais adversas.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, Mudanças climáticas, Seca, Estresse Hídrico

RESISTANCE AND RESILIENCE OF COFFEE PLANTATIONS TO WATER DEFICIT IN THE SOUTH OF MINAS GERAIS: AN APPROACH THROUGH VEGETATION INDICES

ABSTRACT: The knowledge on functional characteristics (resistance, resilience, and others) of coffee plantations to the duration and intensity of drought is of strategic importance, since some studies indicate limitation for coffee crop and production in currently producing regions facing global warming. From this perspective, our objective was access the resistance and resilience of coffee plantations to water deficit through the following vegetation indices: *Land Surface Water Index* (LSWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI), obtained by remote sensing techniques in the southern region of Minas Gerais State, Brazil. The vegetation indices were obtained from MODIS imagery (between 2003 and 2010). LSWI was used to define the duration and intensity of drought, and NDVI and EVI to assess the responses of resilience and resistance of coffee plantation to water deficit. We observed in 2003 and 2010 a higher duration and intensity of drought, according to the LSWI. And according to NDVI and EVI, 2009 showed the lowest values of resilience and the highest resistance of coffee plantations to water deficit. This information can be used to better define the critical values of intensity and duration of drought and for monitoring physiological parameters such as coffee plantations, providing information to forecast potential impacts of future climate scenarios and the definition of strategic actions for crop management in adverse environmental conditions.

Key words: Remote sensing, Climate Change, Drought, Water Stress

INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o aumento da concentração de gases na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), tem intensificado o efeito estufa natural causando o aquecimento global. Nesta situação são previstas alterações no sistema climático terrestre para as próximas décadas, como a elevação da temperatura média do ar e mudanças em escala de macro, meso e de microclima relacionadas aos padrões de distribuição da precipitação (IPCC, 2007; LIN, 2007; CERRI et al., 2007). Porém, ainda são pouco conhecidas as possíveis consequências das mudanças climáticas sobre o funcionamento de ecossistemas naturais e agrícolas, bem como as respostas ecológicas e morfofisiológicas da vegetação a eventos de estresses ambientais.

As variações ambientais modificam as respostas morfofisiológicas ao nível foliar, alterando as propriedades ópticas da vegetação e os padrões de reflectância das folhas e dos dosséis. Uma maneira de compreender essas respostas é através da utilização das técnicas de sensoriamento remoto, permitindo monitorar a duração e a intensidade do

estresse ambiental, a capacidade da vegetação em se manter estável (resistência) e sua habilidade em retornar ao estado normal após o estresse (resiliência) (BLACKBURN, 2007; FIELD et al., 1995; LEVIZOU et al., 2005; RICHARDSON et al., 2001; SIMS & GAMON, 2002).

A obtenção e o correto uso dessas informações são fundamentais para compreender o papel que os cafezais exercem nos fluxos de matéria e de energia entre a superfície e a atmosfera, bem como para verificar a condição fisiológica do sistema de produção de café frente às variações ambientais. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a resistência e a resiliência de cafezais do sul de Minas Gerais, frente a eventos sazonais de déficit hídrico, bem como a intensidade e a duração desses eventos no período de 2003 a 2010, através de índices de vegetação obtidos por técnicas de sensoriamento remoto.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O foco deste estudo foi a área correspondente aos cafezais da região do sul de Minas Gerais, delimitada aproximadamente entre as latitudes $-22^{\circ}15'$ e $-20^{\circ}15'$ e longitudes $-47^{\circ}10'$ e $-45^{\circ}10'$ (Figura 1). Os cafezais foram identificados a partir de interpretação visual de imagens LANDSAT devidamente co-registradas com as imagens do sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) dos satélites 'Terra' e 'Aqua', obtidas do banco de dados de uso livre da Agência Espacial Norte-Americana (NASA), no site <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

Foram selecionados os *pixels* com 100% de cafezal do MODIS Terra e Aqua com resolução de, respectivamente, 250m (6,25 ha) e 500m (12,5 ha), para os anos de 2003 a 2010. Os cafezais analisados apresentaram elevado índice de biomassa, ou seja, representavam lavouras com elevado vigor vegetativo, ou com maior densidade de plantas, e em fase de produção.

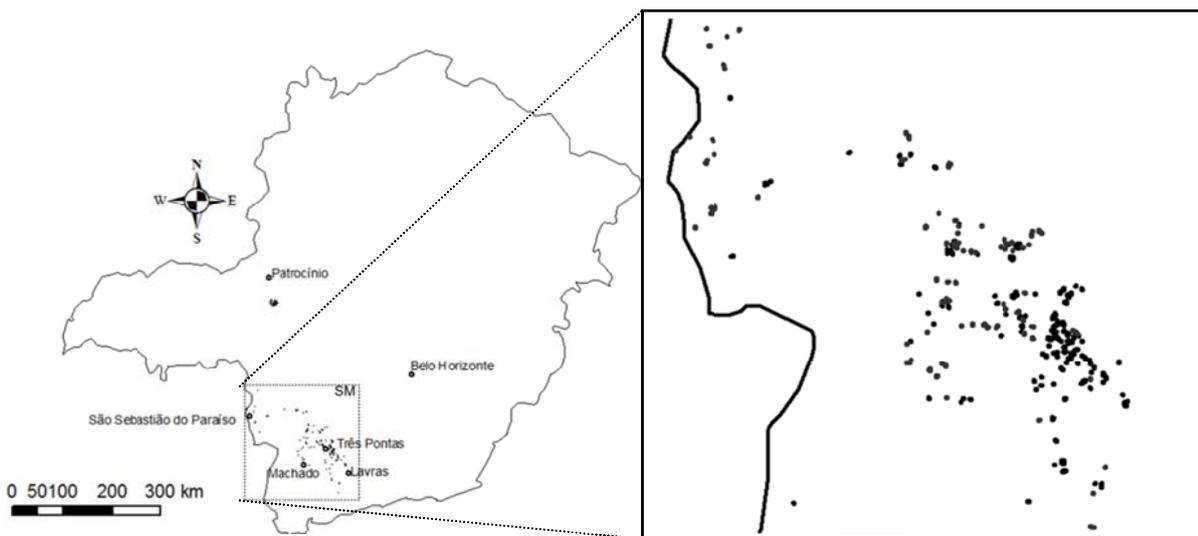


Figura 1 – Mapa de Minas Gerais com a localização dos cafezais do sul do Estado. O quadro representa em maior detalhe os *pixels* de cafezais com alta biomassa, utilizados neste estudo.

Índices de vegetação

O primeiro índice analisado foi o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, ROUSE et al., 1974), usado em numerosas aplicações regionais e globais para estudar o estado fisiológico da vegetação. Em virtude das suas limitações em relação à saturação, devido às múltiplas camadas de um dossel vegetativo, sensibilidade a aerossóis atmosféricos e efeitos do solo (HUETE et al., 2002; XIAO et al., 2004), foi utilizado o EVI (*Enhanced Vegetation Index*, HUETE et al., 2002) para otimizar o sinal da vegetação e minimizar as fontes de incertezas imputadas pelo NDVI (LIU e HUETE, 1995), pois inclui a banda do azul para a correção atmosférica (XIAO et al., 2005).

Outro índice utilizado foi o LSWI (*Land Surface Water Index*, XIAO et al., 2002), sensível ao conteúdo de água na vegetação e à disponibilidade de água da superfície. Com o aumento do conteúdo de água dentro das folhas devido à presença de um solo úmido, ocorre uma diminuição da reflectância, resultando no aumento do valor do LSWI (XIAO et al., 2005). Quanto à resolução temporal dos índices, tem-se 16 dias para os índices NDVI e EVI e oito dias para o LSWI.

Variáveis avaliadas

Os dados dos índices de vegetação foram filtrados no intervalo de 25% a 75% da distribuição normal dos valores extraídos para cada *pixel*, a fim de eliminar os valores espúrios. Foi identificado um total de 684 *pixels*, sendo cada *pixel* uma repetição para as análises de duração e intensidade do déficit hídrico e de resistência e resiliência dos cafezais ao déficit hídrico, através dos índices de vegetação. A partir desta filtragem, obteve-se os valores da média e desvio-padrão dos *pixels* ao longo dos anos.

Pela diferença entre a média e o desvio-padrão, definiu-se o valor mínimo em que a vegetação tem o seu limite para entrar em situação de déficit hídrico, sendo esses valores iguais a 0,629, 0,389 e 0,044 para NDVI, EVI e LSWI, respectivamente. Assim, foram selecionados os valores abaixo desses limites para a identificação da duração (em dias) e para os cálculos da intensidade do déficit hídrico.

A duração e a intensidade do déficit hídrico foram definidos, respectivamente, pelo comprimento do segmento e pela área abaixo da interceptação entre as curvas da série temporal de LSWI com o valor da diferença entre a média amostral e o desvio padrão (σ) da série amostral (Equações 1 e 2).

$$\text{Duração (dias)} = \overline{AB}(\overline{LSWI} - \sigma LSWI) \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Intensidade} = \int_B^A (\overline{LSWI} - \sigma LSWI) \quad (\text{Equação 2})$$

A e B são os pontos de interseção entre a série temporal de LSWI e de $\sigma LSWI$. As equações 1 e 2 são ilustradas na Figura 2.

Outras variáveis analisadas foram as respostas da vegetação (a resistência e a resiliência) frente a eventos de estresse. A resistência foi definida pela inclinação da reta descendente após os picos de máxima das séries temporais de NDVI e EVI, de modo que uma maior inclinação da reta descendente indica uma menor resistência. A resiliência, por sua vez, é a inclinação da reta ascendente após limite do pico de mínima das séries temporais de NDVI e EVI. Logo, quanto maior a inclinação da reta, maior a resiliência (Figura 2).

A similaridade entre valores anuais de duração, resistência, resiliência e intensidade foram comparados pelo teste-t a $P < 0,05$, levando-se em consideração um intervalo de confiança de 95%, definido como $2 \times \sigma$.

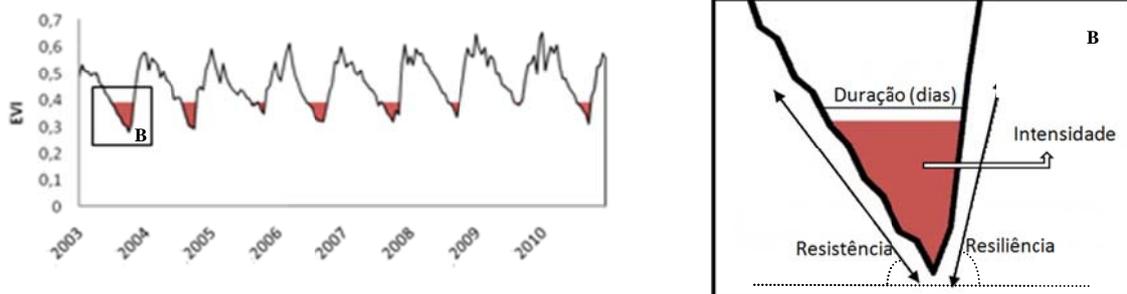


Figura 2- Esquema das séries temporais dos índices de vegetação, representado pela série de EVI no período de 2003 a 2010. O quadro B é um esquema representativo de um pico de mínima, após a definição do valor limite de estresse (σ EVI). Em vermelho estão representadas as áreas calculadas abaixo do valor limite de estresse.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as análises, foram consideradas a duração e a intensidade do déficit hídrico como as variáveis mais importantes para explicar a resiliência e a resistência dos cafezais frente à variação de fatores ambientais, uma vez que a água disponível no solo é uma variável que encerra características de precipitação, temperatura e balanço de radiação solar. Verificou-se que os anos de 2003 e 2010 foram os de seca mais intensa e duradoura ($P < 0,05$) (Figura 3). Isto ocorreu, provavelmente, devido ao ano de 2009 ter sido caracterizado como um ano sem déficit hídrico acentuado, o que contribuiu para o armazenamento de água no solo e sua total utilização em 2010, que apresentou um período de seca atípico, corroborando com os dados (não publicados) de balanço hídrico do sul de Minas Gerais. Essas informações relativas ao balanço hídrico foram baseadas em dados coletados na estação climatológica principal de Lavras (44° 59' 59 W e 21° 14' 43 S), indicando elevados déficits de armazenamento de água no solo, em 2010.

As informações sobre déficit hídrico, obtidas através da análise de séries temporais de LSWI para os cafezais do sul de Minas Gerais, são de fácil aquisição e de baixo custo, com importante potencial para serem empregadas na definição de valores críticos de déficit hídrico. Esses valores críticos representam o limiar entre condições normais e

adversas, que podem ocasionar danos a mecanismos fisiológicos das plantas de café, diminuindo a resistência do aparato fotossintético, elevando a resistência à difusão de gases através dos estômatos (DAMOUR et al, 2009) e alterando o comportamento fisiológico do cafeeiro (DaMATTA et al, 2003; KANECHI et al, 1996; CAI et al, 2005). Esses danos fisiológicos podem resultar em prejuízos à produção de café.

Além de sua utilidade na definição de valores críticos de déficit hídrico, essa técnica pode ser empregada no monitoramento espaço-temporal desses valores, o que é importante do ponto de vista da implantação e operacionalização de técnicas de manejo e de políticas agrícolas que visem reduzir impactos negativos do clima sobre a produção de café.

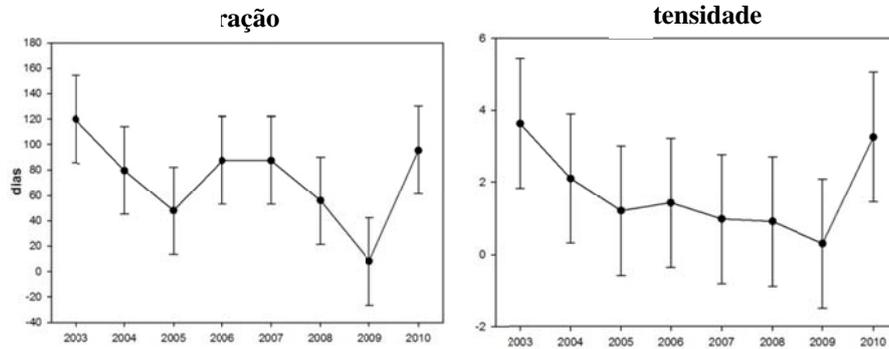


Figura 3 – Duração e intensidade do déficit hídrico, definidos pela série temporal de LSWI, ao longo dos anos de 2003 a 2010. Os pontos indicam os valores anuais observados e as barras, o intervalo de confiança de 95%.

A análise dos valores de resiliência e resistência, baseados nas séries temporais de NDVI e EVI indicaram o ano de 2009 com os menores valores de resiliência e as maiores resistências dos cafezais às condições de estresse impostas pela época seca nos anos de 2005 e 2009, segundo os dois índices de vegetação (Figura 4). Este fato pode ser uma resposta tardia ao déficit hídrico prolongado dos anos de 2006 e 2007, que podem ter induzido mecanismos que diminuiriam a resiliência e elevaram a resistência de 2007 a 2009.

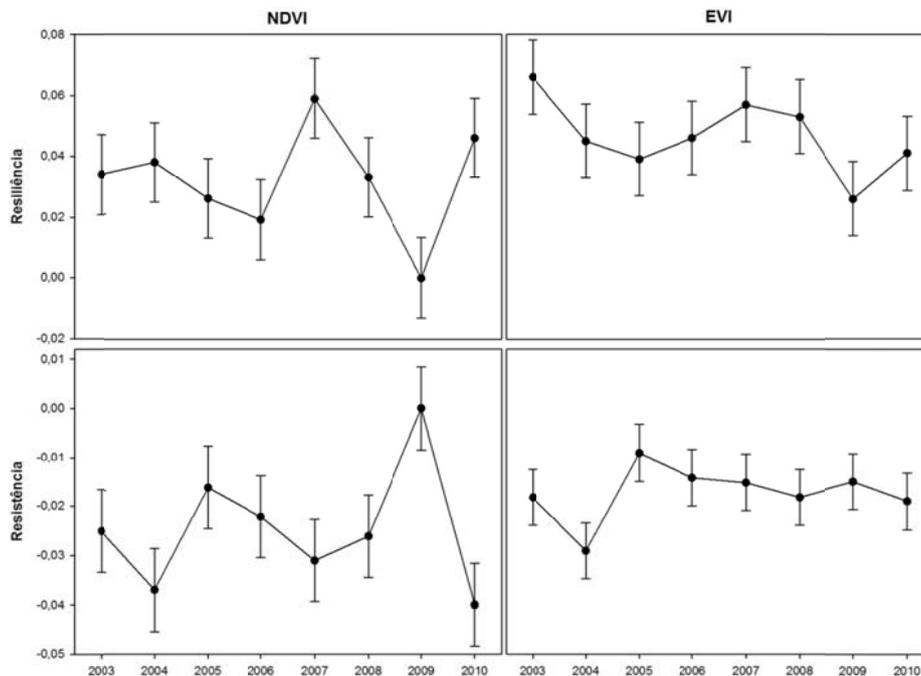


Figura 4 – Valores de resistência e resiliência de cafezais ao déficit hídrico, segundo os índices NDVI e EVI ao longo dos anos de 2003 a 2010. Os pontos indicam os valores anuais observados e as barras, o intervalo de confiança de 95%.

Esse processo permitiu que a seca de 2009, relativamente menos intensa, tivesse poucos impactos nos processos funcionais dos cafezais, ao mesmo tempo em que permitiu um processo de “dehardening”. Tais fatos podem ter levado os cafezais do sul de Minas Gerais à uma condição fisiológica menos apta para responder com ajustes no

nível de fluxos e de processos à deficiência hídrica severa de 2010, elevando a necessidade de mecanismos de resiliência para reparar os danos causados por essas condições adversas.

Dessa maneira, pode-se dizer que a obtenção de índices referentes à resistência e à resiliência de cafezais, a partir de séries temporais dos índices NDVI e EVI, possui importante potencial para a obtenção de parâmetros de monitoramento fisiológico de cafezais, fornecendo informações para previsões de impactos potenciais em cenários futuros e na definição de ações estratégicas de manejo da cultura em condições ambientais adversas. Isso se deve ao fato de que os índices de vegetação, obtidos por técnicas de sensoriamento remoto, são importantes na definição de respostas espectrais da vegetação resultantes das alterações morfofisiológicas que são bem expressivas diante de situações de estresses, como eventos de déficit hídrico, devido à sua estreita correlação com vários parâmetros biofísicos da vegetação (HUETE et al, 1988).

CONCLUSÕES

Ao longo do período analisado foi possível observar a sensibilidade de cafezais de alta biomassa do sul de Minas Gerais ao déficit hídrico. Observou-se que esses sistemas, em geral, apresentaram uma baixa capacidade de se manterem resistentes a eventos de estresse climático. Por outro lado, os dados sugerem que os cafezais podem apresentar rápida resposta de resiliência aos impactos da seca, através de mecanismos de reparo, quando as condições ambientais se estabelecem sem fatores de estresse.

As variáveis obtidas pelas técnicas de sensoriamento remoto são importantes ferramentas relacionadas às respostas espectrais de cafezais à variabilidade de fatores ambientais, apresentando grande potencial para serem utilizados para identificar condições de risco, bem como para monitoramentos das lavouras em escala regional.

Essas informações são fundamentais no desenvolvimento de modelos funcionais para previsão de uso da terra e de produção de café em cenários de mudanças globais, podendo ser utilizadas no suporte de ações estratégicas que visem reduzir riscos ambientais para a produção de café, tornando o sistema mais sustentável e minimizando os impactos diretos e indiretos sobre os setores sócio-ambientais mais vulneráveis.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo apoio financeiro para participação no VII Simpósio de Pesquisa dos Cafês do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLACKBURN, G.A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 855–867, 2007.
- CAI, Z.Q.; CHEN, Y.J.; GUO, Y.H.; CAO, K.F. Responses of two field-grown coffee species to drought and re-hydration. **Photosynthetica** 43 (2): 187-193, 2005
- CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, v.64, n.1, p.83-99, 2007.
- DaMATTA, F.M., CHAVES, A.R.M., PINHEIRO, H.A., DUCATTI, C., LOUREIRO, M.E.: Drought tolerance of two field-grown clones of *Coffea canephora*. **Plant Sci**. 164: 111-117, 2003.
- DAMOUR, G.; VANDAME, M.; URBAN, L. Long-term drought results in a reversible decline in photosynthetic capacity in mango leaves, not just a decrease in stomatal conductance. **Tree Physiology** 29, 675–684, 2009.
- FIELD, C. B.; GAMON, J. A.; PENUELAS, J. Remote sensing of terrestrial photosynthesis. In: Ecophysiology of Photosynthesis (eds Schulze E. D.; Caldwell, M. M.), p. 511–527. **Springer Verlag**, Berlin. 1995.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.
- HUETE, A., DIDAN, K, MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., FERREIRA, L. G., 2002, “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices”, **Remote Sensing of Environment**, v. 83, pp.195–213.
- IPCC. Climate Change 2007: **The Physical Science Basis: Summary for Policymakers**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, February 2007.

- KANECHI, M.; UCHIDA, N.; YASUDA, T.; YAMAGUCHI, T. Non-Stomatal Inhibition Associated with Inactivation of Rubisco in Dehydrated Coffee Leaves under Unshaded and Shaded Conditions. **Plant Cell Physiol.** 37(4): 455-460, 1996.
- LEVIZOU, E.; DRILIAS, P.; PSARAS, G. K.; MANETAS, Y. Nondestructive assessment of leaf chemistry and physiology through spectral reflectance measurements may be misleading when changes in trichome density co-occur. **New Phytologist.** 165, p. 463–472. 2005.
- 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.
- LIU, H.Q.; HUETE, A., 1995, “A Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise”, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, pp. 457-465.
- RICHARDSON A.D.; BERLYN G.P.; GREGIORE T.G. Spectral reflectance of *Picea rubens* (Pinaceae) and *Abies balsamea* (Pinaceae) needles along an elevational gradient, Mt. Moosilauke, New Hampshire, USA. **American Journal of Botany**, v. 88, p.667–676, 2001.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. and D. W. DEERING, 1974, “**Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS**,” Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-3017.
- 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.
- XIAO, X., MOORE, B., QIN, X., SHEN, Z., BOLES, S., 2002. Large-scale observation of alpine snow and ice cover in Asia: using multi-temporal VEGETATION sensor data. **International Journal of Remote Sensing** 23 (11), 2213–2228.
- XIAO, X. M., ZHANG, Q. Y., BRASWELL, B., URBANSKI, S., BOLES, S., WOFESY, S. MOORE III, B., OJIMA, D., 2004, “Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data”, **Remote Sensing of Environment**, v. 91, pp. 256-270.
- XIAO, X.; ZHANG, Q.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; MOORE III, B. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using modis and climate data. **Ecological Applications** 15, p. 954–969; 2005.