

Caracterização da dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI em plantações de *Pinus* do Brasil

Clayton Alcarde Alvares ¹
Juliana Soares Biruel Munhoz ²
José Luiz Stape ³
James Stahl ⁴
Luiz Andrade ⁵
Gustavo Santos ⁶
Renato Lima ⁷
Rodrigo Toledo Coutinho ⁸
Reinaldo Hoinacki ⁹
Tom Fox ¹⁰

¹ Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF e Forest Productivity Cooperative - FPC
Av. Comendador Pedro Morganti, 3500 - CEP 13415-000 - Piracicaba/SP
clayton@ipef.br

² Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/US, Piracicaba, SP, Brasil.
jsbiruel@usp.br

³ North Carolina State University – NCSU - Raleigh – NC, USA
stape@ncsfnc.cfr.ncsu.edu

⁴ Klabin - Telêmaco Borba, Paraná, Brasil
jstahl@klabin.com.br

⁵ Rigesa - Três Barras, Santa Catarina, Brasil
luiz.andrade@mwv.com

⁶ Caxuana – Nova Ponte, Minas Gerais, Brasil
gustavo.santos@caxuana.com.br

⁷ Valor Florestal – Jaguariaíva, Paraná, Brasil
renato.lima@valorflorestal.com.br

⁸ Arauco – Curitiba, Paraná, Brasil
rcoutinho@arauco.com.br

⁹ Juliana Florestal Ltda – Caçador, Santa Catarina, Brasil
reinaldo@frameport.com.br

¹⁰ Virginia Tech - Blacksburg, VA, USA
trfox@vt.edu

Abstract. Because of the lack of studies using vegetation indices to estimate leaf area index and stem biomass of pine forests in Brazil, this study aims to characterize the dynamics of vegetation indices NDVI and EVI in *Pinus taeda* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* plantations along a geographic gradient in Brazil, using time series MODIS data. For this, from an experimental network named Potential Productivity of Pine in Brazil - PPPIB, we used 83 stands of pine ranging from 7 to 19 years old distributed since Minas Gerais to Santa Catarina where the productivity varies from 15 to 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. We collected, between February, 2000 to October, 2012, 293 images from MODIS Vegetation Index. The NDVI and EVI allowed to characterize the inter and intra-annual sites variation of Pine forests from planting to adult age, where the highest rates of NDVI and EVI were observed at the most productivity site. The combination use of both indexes can be applied to capture

the leaf area peaks of Pine in all periods (with and without water deficiency) where usually occur in tropical Pine plantations. While the EVI can be used in Brazil when there are sites with high rainfall along the year.

Palavras-chave: MODIS, *Pinus taeda*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, balanço hídrico.

1. Introdução

As áreas de florestas plantadas no Brasil tem se expandido ao longo dos anos e ocupado uma posição de destaque na economia mundial. Dentre os gêneros mais plantados no país, o *Pinus* se destaca devido à sua ampla diversidade de uso e adaptação às condições climáticas brasileiras, o qual alcançou uma produtividade média de $36,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, se aproximando da produtividade média do *Eucalyptus* no país com $40,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (ABRAF, 2012), onde ambas são reconhecidas atualmente como as maiores produtividades do mundo. Consequentemente, a exportação de biomassa nestas florestas representa grandes estoques de carbono ao longo dos sítios e dos anos.

Estudos sobre a ecologia da produção tem mostrado que a produção de biomassa da parte aérea da floresta (principalmente do fuste) está diretamente relacionada ao índice de área foliar (IAF) e consequentemente à absorção de radiação, a qual pode ser influenciada pela arquitetura do dossel, área foliar, fenologia e fisiologia das folhas (Albaugh et al., 2004; Binkley et al., 2012; Flores et al., 2006). A necessidade de estimar as características biofísicas da floresta, monitorar seus estoques de carbono em grande escala e além disso, conhecer detalhadamente o dossel florestal, tem requerido a aplicação de modelos ecofisiológicos e a utilização do sensoriamento remoto (Alvares et al., 2010; Running et al., 1986).

Considerado um dos índices mais utilizados, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalization Differentiate Vegetation Index*) utiliza as faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo e relaciona seus resultados com propriedades biofísicas da floresta, como o IAF, a biomassa, a área basal, entre outros (Wang et al., 2004). Entretanto, apesar da ampla utilização deste índice, o NDVI possui suas limitações quanto à sensibilidade da atenuação atmosférica, às variações do brilho do solo e à saturação em áreas com alto IAF (Carlson e Ripley, 1997). Para suprir tais limitações, criou-se o índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) o qual possui maior sensibilidade em regiões com alta produção de biomassa e reduz a influência atmosférica e do solo (Jiang, 2008). Apesar deste índice ter sido desenvolvido para o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), ele também pode ser utilizado para imagens de Landsat TM 4 e 5, no entanto, o EVI também possui suas limitações.

No Brasil, o uso do NDVI, EVI e dos demais índices de vegetação para estimar o IAF e a biomassa do fuste ainda tem sido utilizado apenas para plantios de *Eucalyptus*, o qual tem apresentado grande aplicabilidade para os pesquisadores e silvicultores conhecerem os processos ecofisiológicos que controlam sua floresta (Alvares et al., 2010; Marsden et al., 2010; Maire et al., 2011a; 2011b). Sendo que o *Pinus* no Brasil ainda carece de diversas pesquisas nesta área.

Assim, este estudo tem como objetivo caracterizar a dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI de duas espécies de *Pinus*, tropical e subtropical, ao longo de um gradiente geográfico no Brasil, através séries temporais de dados MODIS.

2. Materiais e métodos

2.1. Caracterização da área experimental

O presente estudo faz parte do projeto cooperativo Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil – PPPIB (www.ipef.br/pppib), o qual possui como principal objetivo estudar o balanço e a alocação de carbono em plantações de *Pinus* sob diferentes tipos de manejo. O PPPIB possui 376 parcelas variando entre 7 a 19 anos de idade, compostas por 96 árvores e área útil

de aproximadamente 700 m² cada parcela. As parcelas do projeto estão inseridas nos 83 talhões utilizados neste trabalho (64 de *Pinus taeda* e 19 de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*), os quais estão distribuídos em um gradiente geográfico ao longo do sul e sudeste brasileiro (Figura 1).

A rede experimental representa a amplitude da produtividade normalmente encontrada nas florestas de *Pinus* do Brasil, entre 15 e 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 1). Os sítios florestais abrangem ampla variação edafo-climática, com temperatura média anual entre 15 e 20°C (Alvares et al. 2012) e precipitação anual entre 1300 e 1800 mm (www.ipef.br/geodatabase).

2.2. Dados MODIS, processamento em GIS, dados climáticos

A coleção completa dos dados MODIS Vegetation Index V005 de 250 metros de resolução espacial (Produto MOD13Q1, Latorre et al., 2007) foi baixada em uma geodatabase e compilada. Este produto é gerado usando dados de reflectância coletados diariamente pelo sensor MODIS Terra os quais são corrigidos dos efeitos atmosféricos (Vermote et al., 2002).

A área de estudo abrange os “tiles” h13/v10 e h13/v11. A base consta de 293 imagens entre 18 de fevereiro de 2000 e 31 de outubro de 2012, somando 360 GB de dados. Todos os arquivos MODIS baixados foram processados no software MODIS Reprojection Tool (Dwyer e Schmidt, 2006) para extração dos dados, projetar em Sistemas de Coordenadas Geográficas e Datum WG1984, compilar os mosaicos dos “tiles”, e padronizar a resolução espacial em 250 m dos arquivos NDVI e EVI.

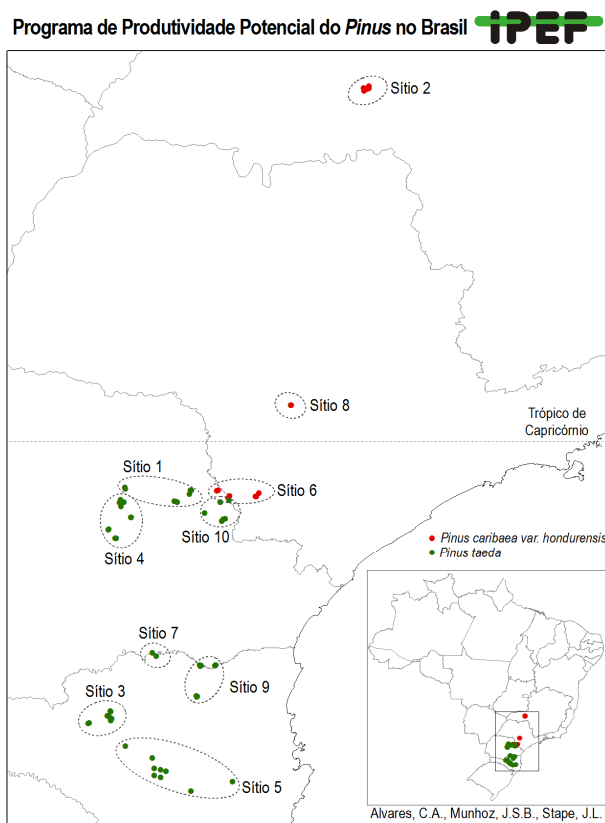


Figura 1 – Localização dos talhões de *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Os 83 talhões PPPIB foram georreferenciados e desta forma o melhor pixel MODIS foi escolhido para representar cada um deles. Quando o talhão PPPIB não tinha tamanho suficiente para acomodar um ou mais pixel MODIS, o talhão vizinho, com o mesmo sistema silvicultural (espécie, data de plantio, espaçamento e manejo), foi selecionado para representá-lo. A série temporal inicia-se na primeira imagem MODIS após a data de plantio do referido talhão, com exceção do sítio 8 que foi plantado em 1993.

Tabela 1 – Caracterização climática e biométrica dos sítios a partir de inventário realizado em 2011.

Sítio	Espécie	Região	UF	Idade	N	DAP	Altura	AB	IMA	ICA	Tm	PPT
#	-	-	-	#	(arv ha ⁻¹)	(cm)	(cm)	(m ² ha ⁻¹)	(m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(m ³ ha ⁻¹)	(°C)	(mm)
1	PTA	Arapoti	PR	10.1	1059	21.7	16.8	40.2	32.1	86.0	18,4	1450
2	PCH	Nova Ponte	MG	10.9	1512	19.5	19.7	47.3	40.9	34.3	20,1	1600
3	PTA	Caçador	SC	8.9	1638	19.3	13.6	50.0	32.7	53.2	15,0	1740
4	PTA	Telêmaco Borba	PR	10.0	1314	20.2	16.0	47.2	33.1	28.5	18,9	1470
5	PTA	Otaçílio Costa	SC	10.0	1326	22.7	15.0	56.0	34.5	41.5	15,9	1780
6	PCH	Itararé	SP/PR	7.5	1121	20.7	14.3	39.1	33.6	54.9	17,6	1320
7	PTA	Mafra	SC	11.0	1516	22.3	18.8	61.4	46.7	56.1	17,4	1530
8	PTA	Itatinga	SP	18.0	1432	18.0	15.8	38.4	14.4	33.4	18,7	1300
8	PCH	Itatinga	SP	18.0	1002	24.1	24.2	48.8	30.7	21.2	18,7	1300
9	PTA	Rio Negrinho	SC	10.8	1405	20.9	14.9	50.6	32.0	36.8	17,0	1510
10	PTA	Jaguariaíva	PR	11.2	1345	21.1	15.4	49.6	30.9	37.1	17,2	1420

PTA = *Pinus taeda*; PCH = *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; N = densidade média de árvores; DAP = diâmetro à altura do peito médio; AB = área basal média; IMA = incremento médio anual; ICA = incremento corrente anual; Tm = temperatura média anual; PPT = precipitação média anual.

Foi elaborado um modelo usando os recursos da ferramenta “ModelBuilder” (Allen, 2011) do sistema de informação geográfica ArcGIS 10 (ESRI, 2010) para automatizar a extração dos índices de vegetação de cada talhão e nas diferentes datas das imagens.

A coleção mensal dos dados meteorológicos dos municípios de Nova Ponte (MG), Itapeva (SP) e Caçador (SC) foi obtida no Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (www.agritempo.gov.br) e no Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (www.ciiagro.sp.gov.br). O balanço hídrico mensal sequencial foi elaborado usando uma planilha programada por Rolim et al. (1998) e calculado conforme Thornthwaite e Mather (1955).

3. Resultados e discussão

Foi observada forte variação inter e intra-anual dos índices de vegetação nos diferentes sítios florestais estudados (Figura 2). A variação inter-anual inicial (pós-plantio) foi detectada com boa qualidade nos sítios 3, 5, 7, 9 e 10, mostrando o rápido crescimento dos índices de vegetação no desenvolvimento inicial das plantações de *Pinus*. Nestes sítios, os valores iniciais de NDVI variaram entre 0.4 e 0.6, e os valores de EVI ficaram entre 0.2 e 0.3, sendo esses valores típicos para o curto período entre a reforma e o início do crescimento da nova plantação. Marsden et al. (2010) e Maire et al. (2011a) observaram, para plantações de *Eucalyptus*, valores de NDVI inferiores neste período, o que provavelmente seja devido aos diferentes sistemas de manejo dos resíduos da colheita. Por outro lado, estes mesmos autores registram NDVI semelhantes para os primeiros anos da floresta.

Em florestas de rápido crescimento de *Eucalyptus*, o NDVI supera a faixa de 0.9 já no segundo ano e repete o pico do índice no terceiro e no máximo no quarto ano de plantio (Marsden et al., 2010; Maire et al., 2011a). Em *Pinus*, essa faixa de NDVI é alcançada a partir do quinto ano e em alguns casos mantém acima deste valor até o 11 anos, que é a idade atual das florestas PPPIB (Figura 2). O sítio 7, o mais produtivo (Tabela 1), aos dez anos de idade atingiu o maior valor de NDVI, 0,959, e EVI de 0,699. Depois dessa fase de crescimento, entre 11 e 12 anos, os máximos e mínimos tendem a decrescer com a idade, conforme observado no sítio 8, com plantio de 19 anos (Figura 2).

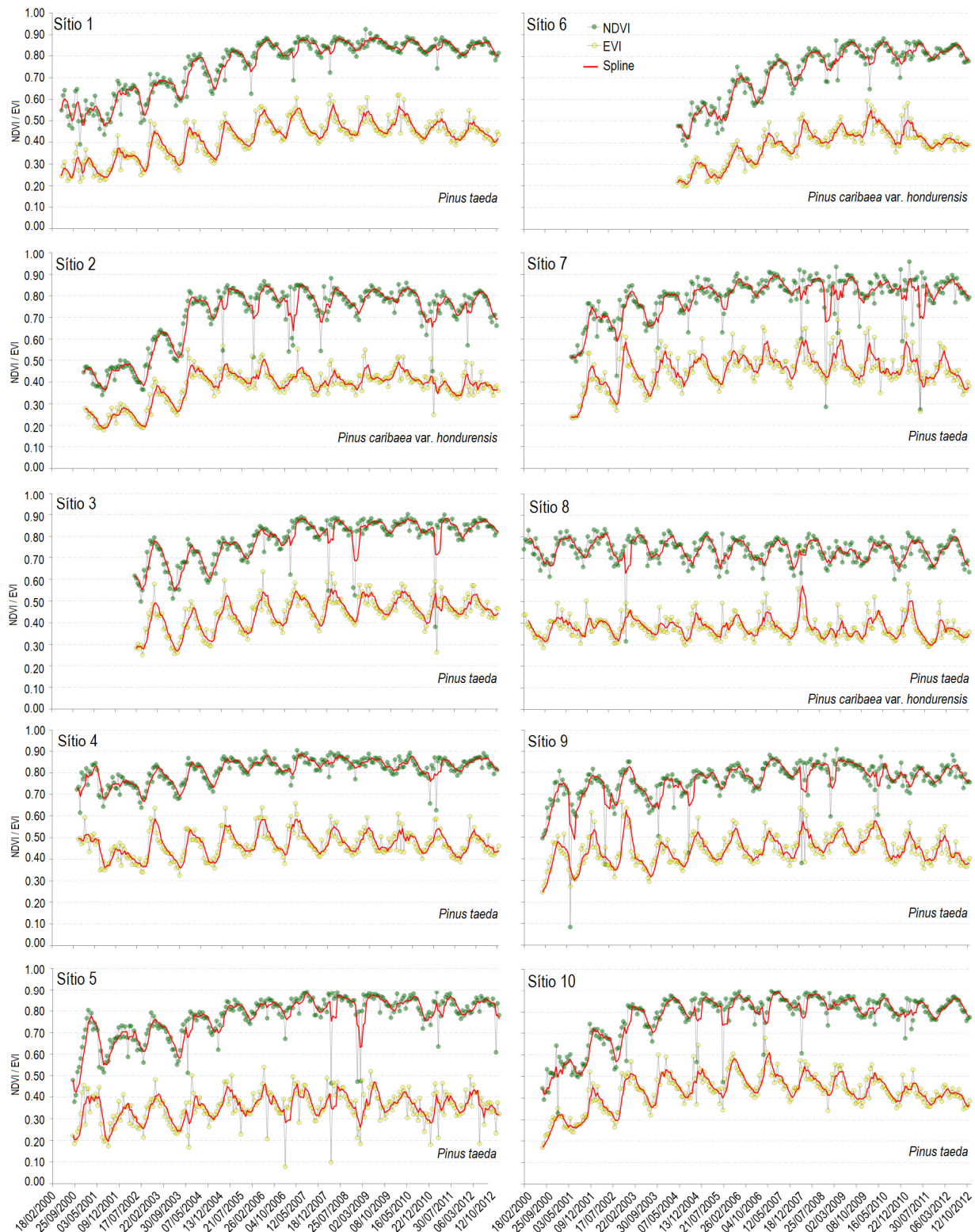


Figura 2 – NDVI e EVI médios e ajustados dos talhões de cada sítio do projeto PPPIB.

Embora o presente estudo trate de um gradiente latitudinal de 1000 km entre o sudeste e o sul do Brasil, os máximos e mínimos NDVI e EVI seguem um padrão sazonal semelhante. Os sítios 1, 4, 6, 8 e 10 apresentam máximos valores entre fevereiro e março e mínimo entre agosto e setembro (Figura 2). Os sítios do sul, 3, 5, 7 e 9, apresentam pico dos índices entre março e abril, sendo que os mínimos foram observados entre setembro e outubro. O sítio mais setentrional, 2, apresenta comportamento ligeiramente diferente: os máximos são

característicos de março a abril, e devido ao atraso do início das chuvas na região do triângulo mineiro em relação às outras regiões, os mínimos NDVI e EVI são observados entre outubro e novembro, e algumas vezes em dezembro, dependendo do regime hídrico do período.

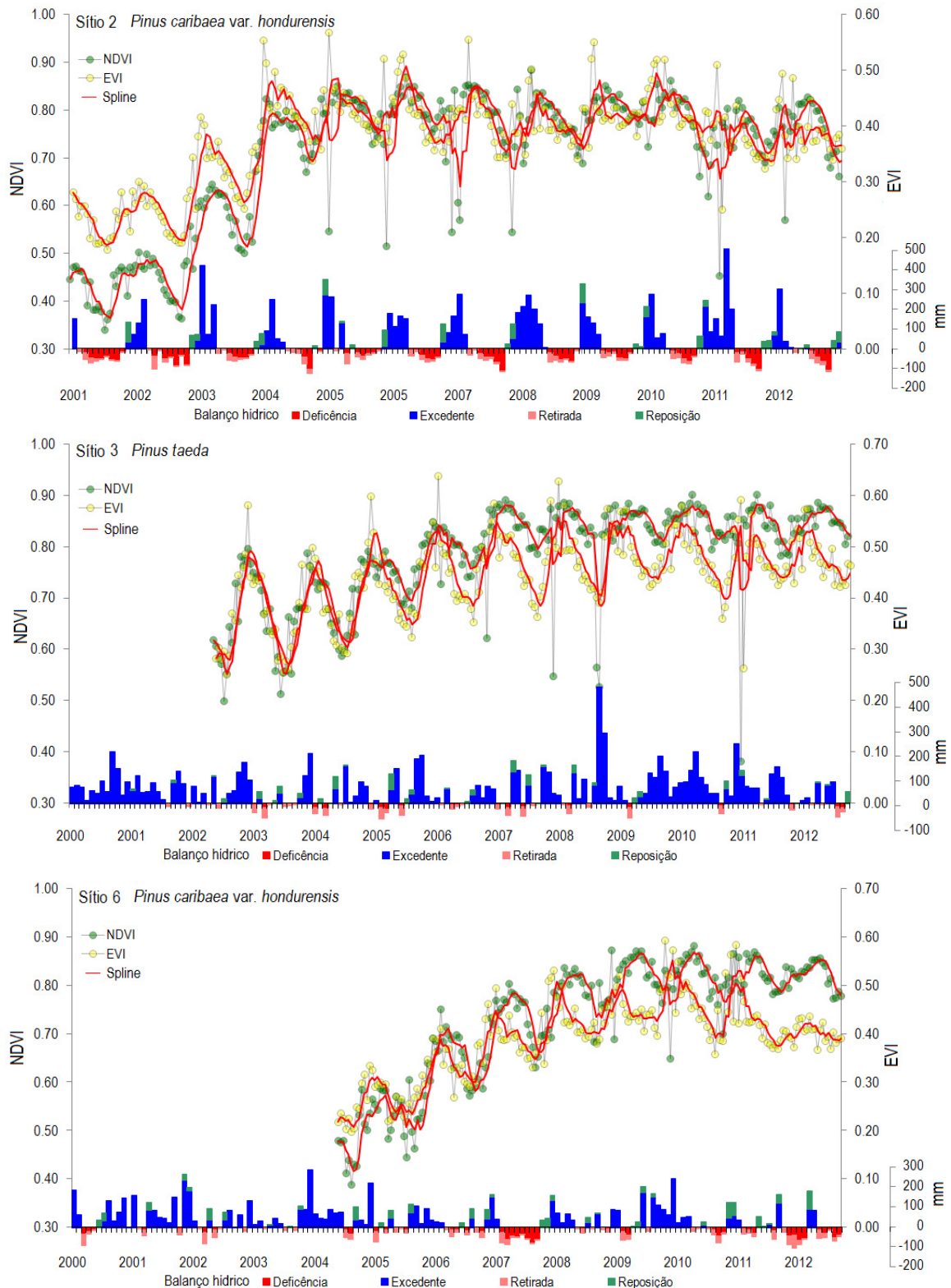


Figura 3 - NDVI e EVI médios e ajustados para os talhões dos sítios florestais 2, 3 e 6 do projeto PPPIB e o balanço hídrico mensal sequencial calculado conforme Thornthwaite e Mather (1955).

Desta forma, foram selecionados três sítios crescendo sob diferentes estresses hídricos onde os NDVI e EVI foram plotados em conjunto com o balanço hídrico mensal sequencial. Em Nova Ponte (MG), sítio 2, o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* crescendo à taxa média de $40,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 11 anos) mostrou forte variação sazonal dos índices de vegetação respondendo aos estresses hídricos observados durante o inverno da região (Figura 3).

Os índices apresentam comportamentos diferentes nos máximos e mínimos períodos de crescimento. Logo no início dos períodos de disponibilidade de água o EVI marca um forte pico e depois tende a se estabilizar por poucas semanas quando então volta a decrescer. Nesta época chuvosa o NDVI tende a manter-se elevado por mais tempo, sendo pouco sensível neste período. Por outro lado, quando há estresse hídrico mais forte no final do inverno, entre agosto e setembro, o EVI mostra pouca sensibilidade e mantém-se baixo por várias semanas ou meses, enquanto que nestas condições o NDVI é mais rápido, decresce repentinamente quando há severidade da seca, como pode ser observado no sítio 6 (Figura 3), o que mostra a importância da utilização dos dois índices em conjunto para este tipo de clima.

A região de Caçador, Santa Catarina (sítio 3), não apresentou déficit hídrico importante durante o período do estudo, porém a sazonalidade da temperatura, umidade do ar, radiação global e fotoperíodo marcaram forte variação inter e intra-anual nos índices de vegetação nos primeiros 4 anos da plantação de *Pinus taeda* (Figura 3). Os resultados deste sítio mostraram que o EVI parece ser o índice mais importante para captar os máximos e os mínimos de área foliar nas plantações de *Pinus* em regiões ausentes de deficiência hídrica no Brasil, o que deverá ser tema de pesquisa na próxima etapa deste estudo. Esta futura fase inclui calibrações de campo para obter algoritmos estimadores do índice de área foliar e um estudo comparativo entre o sudeste dos Estados Unidos e o sul do Brasil para identificar o porquê da elevada produtividade das florestas brasileiras de *Pinus*.

4. Conclusões

Os índices NDVI e EVI permitiram caracterizar a variação inter e intra-anual dos sítios de *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* desde o plantio até a idade adulta. Os maiores índices de NDVI e EVI foram observados no sítio com maior produtividade.

As variações climáticas de cada sítio influenciaram o padrão sazonal dos índices. A utilização em conjunto dos dois índices pode ser utilizada para captar os picos de área foliar do *Pinus* tanto em períodos com deficiência hídrica quanto para excedente. Enquanto que o EVI poderá ser utilizado quando houver sítios com alta precipitação pluviométrica ao longo de todo o ano.

Agradecimentos

Ao projeto PPPIB, aos engenheiros e técnicos das empresas florestais (Arauco, Arborgen, Caxuana, Juliana, Klabin, Masisa, Rigesa e Valor Florestal) e da Estação Experimental de Itatinga (ESALQ/USP) pelo apoio no projeto. À estudante de engenharia florestal Tainã Scarano (ESALQ/USP) pelo auxílio no processamento dos dados MODIS.

Referências Bibliográficas

Allen, D.W. **Getting to know ArcGIS ModelBuilder**. ESRI Press, Redlands, 2011.

Albaugh, T. J.; Allen, H.L.; Dougherty, F.M.; Johnsen, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, v. 192, n. 1, p. 3-19, 2004.

Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Brasília, 2012. 145 p.

Alvares, C.A.; Campoe, O.C.; Stape, J.L.; Polizel, J.L.; Nouvellon, Y.; Laclau, J.P.; Silva Filho, D.F. Foltran, E. Estimção de variáveis biométricas em Eucalyptus na idade de corte por meio de imagens aéreas multiespectrais de alta resolução. In: **IX Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal**, 2010, Curitiba.

Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, /no prelo/, 2012.

Binkley, D.; Campoe, O.C.; Gspaltl, M.; Forrester, D.I. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, In Press, 2012.

Carlson, T.N.; Ripley, D.A. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p.241-252, 1997.

Dwyer, J.; Schmidt, G. The MODIS reprojection tool. In: Qu, J.J.; Gao, W.; Kafatos, M.; Murphy, R.E.; Salomonson, V.V. (Org.). **Earth science satellite remote sensing**. Berlin: Springer, 2006. p.162-177.

ESRI - Environmental Systems Research Institute, Inc (2010) ArcGIS 10

Flores, F.J.; Allen, H.A.; Cheshire, H.M.; Davis, J.M.; Fuentes, M.; Kelting, D. Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands. **Canadian Journal Forest Research**. v. 36, p. 1587–1596, 2006.

Jiang, Z.; Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.

Latorre, M.L.; Shimabukuro, Y.E.; Anderson, L.O. Produtos para ecossistemas terrestres (MODLAND). In: Rudorff, B.F.T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J.C. (Org.): **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**, São José dos Campos: Ed. Bookimage, p. 23 - 36, 2007.

Maire, G.I.; Marsden, C.; Nouvellon, Y.; Grinand, C.; Hakamada, R.; Stape, J.L.; Laclau, J.P.. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2613-2625, 2011a.

Maire, G.I.; Marsden, C.; Verhoef, W.; Ponzoni, F.J.; Seen, D.I.; Begue, A.; Stape, J.L.; Nouvellon, Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 586-599, 2011b.

Marsden, C.; le Maire, G.; Stape, J.L.; Lo Seen, D.; Rouspard, O.; Cabral, O.; Epron, D.; Lima, A.M.N.; Nouvellon, Y.. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1741-1753, 2010.

Running, S.W.; Peterson, D. L.; Spanner, M. A.; Teuber, K. B. Remote Sensing of Coniferous Forest Leaf Area. **Ecological Society of America**, v. 67, n. 1, p. 273-276, 1986.

Rolim, G.S.; Sentelhas, P.C.; Barbieri, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology).

Vermote, E.F., El Saleous, N.Z., Justice, C.O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 97–111, 2002

Wang, Q.; Tenhunen, J.; Dinh, N.Q.; Reichstein, M.; Vesala, T.; Keronen, P.. Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 1–2, p. 225-237, 2004.