

## **Avaliação do desempenho de safras de cana-de-açúcar e sua relação com a umidade do solo utilizando dados MODIS e TRMM-TMI**

Denis Araujo Mariano  
Maurício Alves Moreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos - SP, Brasil  
denis.mariano@usp.br, mauricio@dsr.inpe.br

**Abstract.** The sugarcane production is the main agricultural activity in the São Paulo state, moreover, it is currently expanding in acreage at high rates. However, this does not mean always an increasing in the yield due to the climate negative factors that might strike such activity sometimes. Drought is for sure, the main nature hazard responsible for decreasing the yields in agriculture. The season of 2013/2014 is being remarkably one of the most affected in São Paulo since the last decades. Measuring the impacts of these phenomena is a daunting task to be carried out by traditional methods, so, Remote Sensing gives powerful techniques and data for doing so. In this work, we used MODIS reflectance and TRMM-TMI soil moisture data for assessing the sugarcane production performance in São Paulo state from 2003 to 2014. As results, we found that according to the proposed methodology, which is based upon EVI data derived from MODIS data, the 2013/2014 season was astoundingly affected and the following tends to be seriously stricken as well. The spatial resolution of the TMI data is the main constraint for performing a good analysis, even though, is a good source for assessing the water availability over large areas allowing us to detect trends and depict scenarios regarding this variable. In short, the EVI accumulated for each season might be affected by the soil moisture, however, because the system is too complex, precise conclusions are difficult to be made.

**Keywords:** sugarcane, drought, MODIS, soil moisture, TRMM-TMI, EVI, cana-de-açúcar, seca, umidade do solo

### **1. Introdução**

A cultivo de cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol representa principal atividade agrícola do estado de São Paulo, sendo este, o maior produtor nacional, responsável atualmente por cerca de 60% da produção. Não obstante, as áreas de cultivo encontram-se em franca expansão desde o início dos anos 2000 (LAPOLA et al., 2013). A produção de cana, assim como grande parte das atividades agrícolas praticadas no Brasil, apresenta como maior responsável pela oscilação em seu desempenho os fatores climáticos. Evidentemente, a disponibilidade de água no solo é um dos principais fatores governantes no acúmulo de biomassa (LOARIE et al., 2011).

De acordo com várias notícias divulgadas na mídia e também por organizações oficiais, o ano de 2014 está sendo marcado (até a data de elaboração deste artigo) como um dos mais secos do último século para o a região sudeste. O impacto negativo deste fenômeno na agricultura é inevitável, porém, também é necessário quantificá-lo de diversas formas. A mais tradicional é simplesmente fazer o levantamento da produtividade atingida nestas safras, o que é demorado e oneroso.

Neste contexto, abordagens baseadas em sensoriamento remoto apresentam-se como ideais para se mensurar o desempenho das safras e desta forma, compará-los entre anos e regiões. Uma abordagem mais completa transcende a avaliação tradicional da mensuração da resposta da planta, estudando assim, os fatores que governam esta resposta. O fator disponibilidade de água é um dos principais e é, por sua vez, passível de ser estimado. Pode-se diretamente analisar

a precipitação ao longo do período, porém, também é possível verificar alternativas mais ousada, como a umidade do solo, que é decorrente da precipitação e outros fatores intrínsecos ao ambiente de produção.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho anual das lavouras de cana-de-açúcar no estado de São Paulo para o período compreendido entre as safras de 2004/2005 a 2013/2014. Adicionalmente, será analisado o comportamento regional da umidade do solo para o mesmo período.

## **2. Abordagem metodológica**

A abordagem metodológica descrita a seguir compreende uma rápida descrição da região estudada, o pré-processamento das imagens MODIS e TRMM-TMI, o processamento de séries temporais e métodos de análise. Por questões de brevidade, não descreveremos minuciosamente alguns processamentos computacionais, no entanto, vale mencionar que todos procedimentos foram realizados em softwares livres como o Quantum GIS e o SagaGis, além de linguagem de programação Python.

### **2.1. Área e período de estudo**

A área de estudo é a região canavieira do estado de São Paulo, porém apenas as mesorregiões mais relevantes na produção de cana-de-açúcar, a saber: Araçatuba, Araraquara, Assis, Bauru, Campinas, Piracicaba, Presidente Prudente, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto. Essa região, como um todo, é responsável por mais da metade da produção de cana-de-açúcar no Brasil, o que evidencia sua relevância.

O período analisado é delimitado pelas safras de 2004/2005 a 2013/2014. Previamente ao estudo, acreditou-se que o período compreenderia anos considerados bons ou úmidos, e anos ruins ou secos. No período estudado, ocorreu sabidamente uma expansão das áreas produtoras de cana-de-açúcar. Sendo assim, foi utilizado para as análises, mapas anuais, fornecidos pelo projeto Canasat. A metodologia de mapeamento foi descrita detalhadamente por Rudorff et al. (2010), a qual é baseada na interpretação visual de imagens dos sensores TM, ETM+ e OLI da série Landsat. De posse destes mapas, os estudos temporais puderam ser realizados com maior precisão, pois compreendem apenas às áreas de cana-de-açúcar para cada ano-safra.

### **2.2. Conjunto de dados**

O acompanhamento do desempenho da cana-de-açúcar ao longo do período foi realizado com base em imagens dos sensores *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra (MOD) e Aqua (MYD). Foi utilizado o produto de reflectância de superfície de sete bandas espectrais (visível e infra-vermelhos) com resolução espacial de 500 m e temporal de 8 dias. Com estas bandas, é possível calcular a maioria dos índices de vegetação tradicionais encontrados na literatura. A resolução temporal é resultado de processamento de imagens diárias do MODIS, porém, buscando menores ângulos de imageamento e cobertura por nuvens. Desta forma, pode se considerar o produto M\_D09A1 como sendo o resultado dos melhores pixels no referido período de 8 dias.

A umidade do solo, neste estudo, é derivada do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) *Microwave Imager* (TMI) banda-X (10,65 GHz), ou simplesmente TRMM-TMI. Os modelos para estimativa da umidade do solo através de dados deste sensor foram desenvolvidos por Gao et al. (2006). Os dados de umidade do solo do TMI são adquiridos duas vezes ao dia com intervalo de 12 horas. Para este estudo, foram utilizados os dados de umidade do dia (daytime). A resolução espacial do dado é de 25km por pixel, o que, embora seja grosseira, é uma boa alternativa aos dados de precipitação ou umidade obtidas por estações

agrometeorológicas. Para amenizar os erros decorrentes da resolução espacial, as imagens foram reamostradas para 500 m, o que não representa ganho de informação, porém, permite uma melhor separação entre *pixels* que estão dentro e fora dos polígonos de cana.

### 2.3. Filtragem de dados espectrais

As imagens dos produtos M\_D09A1, mesmo sendo composições de melhor qualidade possível, ainda apresentam problemas decorrentes da ocorrência de nuvens. Para o presente trabalho, foram adotados dois procedimentos de filtragem para as imagens do MODIS.

A primeira filtragem é a combinação de imagens do Terra com as do Aqua, buscando na medida do possível, substituir *pixels* contaminados por nuvens em uma imagem por *pixels* limpos da outra imagem. O detalhamento dos procedimentos matemático-computacionais encontram-se no repositório on-line ([www.bitbucket.org/geopaitos/python-remotesensing](http://www.bitbucket.org/geopaitos/python-remotesensing)), onde também é possível obter o script em Python para realizar este procedimento (MARIANO; FOSCHIERA, 2014). O resultado é uma imagem composta MxD comparativamente melhor que a MOD ou a MYD.

Mesmo após a filtragem descrita acima, ainda restam muitas áreas contaminadas por nuvens ou outros fatores atmosféricos. Por se tratar de um estudo sobre vegetação, em que a dinâmica apesar de ser intensa, é possível de ser captada pela resolução temporal dos sensores MODIS, é vantajoso realizar uma filtragem temporal da série de imagens. Este procedimento foi realizado utilizando um filtro misto de média e mediana para uma janela de 7 imagens (três anteriores, a atual e três posteriores). O script em Python para realizar o procedimento encontra-se disponível no já referido repositório. Como resultado da filtragem, obteve-se a série de imagens suavizadas, permitindo assim, análises temporais mais refinadas e a completa supressão de *gaps*, o que prejudicaria o procedimento descrito a seguir.

### 2.4. Estratégia para avaliação de desempenho das safras

A forma mais tradicional de se relacionar dados espectrais à biomassa de uma lavoura de cana é através de índices de vegetação. Neste estudo foi utilizado o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (HUETE et al., 2002). A principal ideia foi relacionar o EVI à biomassa foliar de cana, sendo assim, uma aproximação da biomassa real (LOARIE et al., 2011). Partindo-se do princípio de que a biomassa acumulada é, de forma aproximada, resultado da taxa de fotossíntese ao longo do tempo, pode-se utilizar como parâmetro para comparação de biomassa anual entre safras o EVI acumulado. Não foi possível calcular a integral sob a curva, pois não se tem uma função que descreva o ciclo da cana, ao invés, foram calculados os somatórios de EVI nos anos-safra com intervalos de 8 dias. Este método é baseado no proposto por (REN et al., 2008), no qual se estabelece uma relação entre biomassa e índice de vegetação (IV) acumulado para a cultura de trigo. No entanto, para esta pesquisa, esse método tende a apresentar grandes erros, uma vez que a janela de plantio praticada no setor sucroalcooleiro é extremamente diversa, diferentemente do caso do trigo. Essa abordagem fornece apenas um indicativo para comparar diferentes safras e regiões, mas não relacioná-las diretamente à produtividade.

O primeiro procedimento neste sentido foi determinar aproximadamente as datas do início e término do ciclo da cana. No entanto, é sabido que existe cana de ano e de ano e meio (ciclos de 12 e 18 meses, respectivamente), além de todas as nuances varietais, de modo a sempre haver disponibilidade de cana para suprir a demanda da indústria. A estratégia aqui adotada foi, determinar, utilizando-se o EVI médio de uma região, estes períodos de interesse que correspondem aos valores mais baixos do índice. De posse da informação das datas de início e fim da safra de cana, calculou-se o EVI acumulado e assim, estabeleceu-se um parâmetro para comparação inter-safras, já que não se dispunha de dados preciso de produtividade.

## 2.5. Umidade do solo para definição dos tipos de ano

A utilização de dados de umidade do solo para explicar tendências no comportamento da vegetação já foi demonstrada por outros autores (CHEN et al., 2014), tendo sido verificada a correlação entre os fatos, bem como um *lag* de aproximadamente um mês. Isso significa que, de modo geral, um valor altamente adequado de umidade corresponderá a um valor alto (ou crescimento) do índice de vegetação. O mesmo foi constatado por (SANTOS et al., 2014), avaliando EVI-2 em plantações de café e confrontando com dados de umidade de solo, sendo estes últimos obtidos em campo.

No presente estudo, o uso dos dados de umidade do solo tiveram uma finalidade bem mais simplória, diferenciar os anos quanto à sua favorabilidade para a agricultura. Para simplificar, os dados diários foram transformados em médias mensais, de modo a reduzir o volume de imagens. Todas as informações de umidade do solo presentes neste documento estão na unidade  $m^3/m^3$ , que significa  $m^3$  de água por  $m^3$  de solo. Caso seja conveniente para o leitor, basta multiplicar os valores por 100, obtendo os resultados em porcentagem.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Delimitação do período de acúmulo anual

A Figura 1 apresenta o comportamento temporal do EVI da cana-de-açúcar por mesorregião. Os dados estão dispostos em intervalos de 8 dias com início no dia juliano 257 (13 de setembro) de 2012 e final em 249 (5 de setembro) de 2014. A análise do gráfico evidencia o ciclo médio da safra de cana para cada mesorregião, sendo possível observar que os menores valores de EVI ocorrem entre os meses de Setembro e Outubro, independentemente da região analisada. Desta forma, fica definida como data de separação entre duas safras consecutivas o dia 249 (5 de Setembro) de cada ano, embora qualquer data entre Setembro e Outubro pudesse ser escolhida. Vale lembrar que, caso fossem analisadas separadamente a cana de ano e a de ano e meio, as datas seguramente seriam distintas, no entanto, trabalhou-se com a média da região, o que inclui todas as variações de sistema de produção de cana.

### 3.2. Comportamento do EVI por ano safra

A Figura 2 apresenta o acúmulo de EVI em intervalos de 8 dias para um ano safra, iniciando no dia 257 de um ano e finalizando no dia 249 do ano seguinte. Como exemplo, tomemos o caso de São José do Rio Preto para a safra 2012/2013: são 47 imagens para cada safra e a média de EVI obtida para a série temporal desta região foi de 0,37. Fazendo a operação  $47 * 0,37$  obtemos 17,55, que é o valor exibido no gráfico.

Ainda sobre a Figura 2, foi observado que todas as regiões analisadas seguiram o mesmo comportamento entre si ao longo do tempo, podendo ser destacadas como ruins as safras de 2005/2006, 2010/2011 e 2013/2014. Os valores mais elevados foram observados entre as safras 2006/2007 a 2008/2009 e a de 2012/2013. Este comportamento indica que os fatores que governam o acúmulo de EVI atuaram de forma homogênea sobre o estado, havendo pouca discrepância, como no caso da região de Ribeirão Preto para o ano-safra de 2007/2008, que apresentou valor bem mais baixo que as demais regiões. Não foi objetivo deste trabalho confrontar estes dados com os oficiais, uma vez que esses últimos são de natureza subjetiva, o que dificulta a validação da metodologia proposta no sentido de relacioná-la à produtividade de cana-de-açúcar.

A Figura 3 apresenta as regiões quanto à variação do acúmulo de EVI para o período analisado. Observando a mediana dos boxplots, é possível dividir as regiões em três grupos distintos: i) As regiões mais tradicionais onde a atividade canieira é mais antiga, Campinas, Araraquara, Piracicaba e Ribeirão Preto, as quais apresentam os valores mais altos mas também

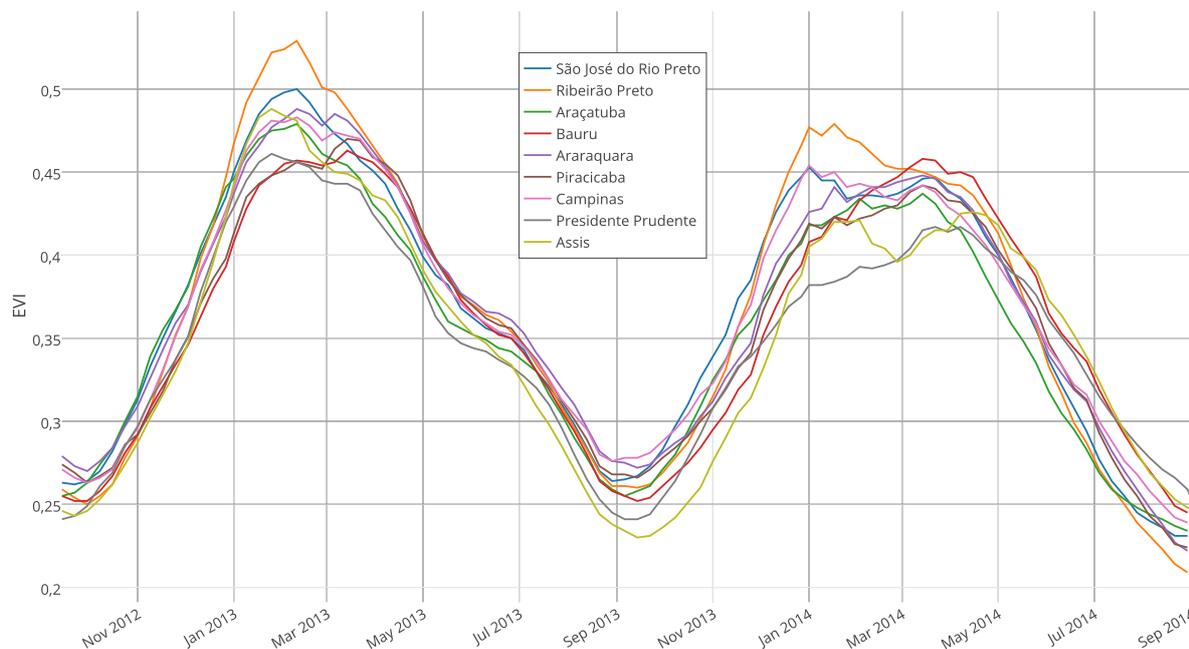


Figura 1: EVI médio da cana-de-açúcar por mesorregião. Os dados estão dispostos em períodos de 8 dias com início no dia 257 (14 de Setembro) de 2012 e final no dia 249 (5 de Setembro) de 2014.

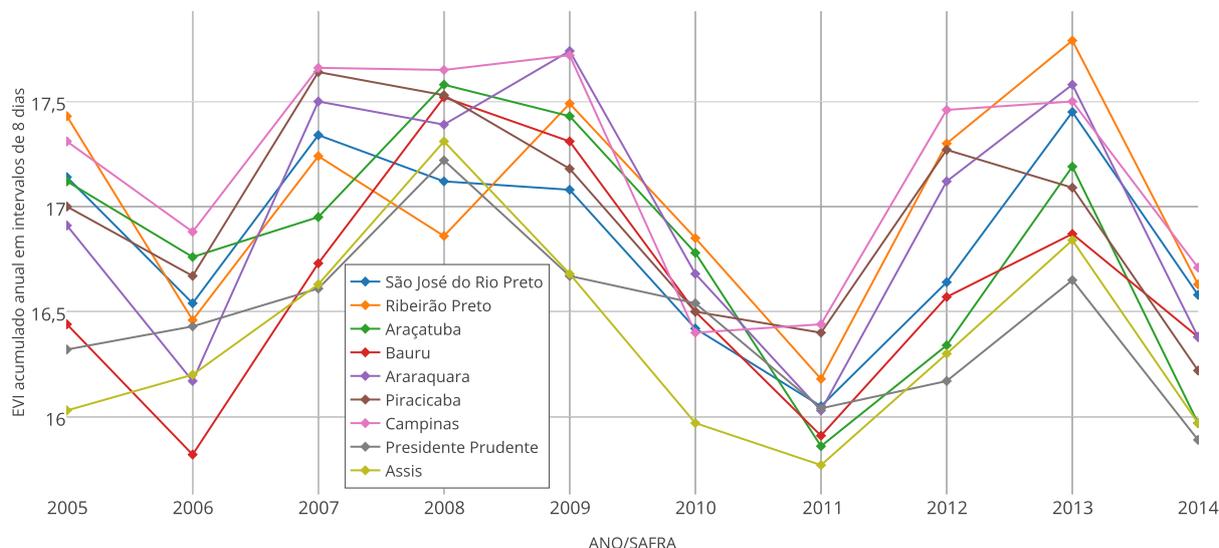


Figura 2: EVI acumulado para intervalos de 8 dias para cada ano safra.

grande variabilidade. *ii*) O oeste e centro-oeste paulista (Bauru, Presidente Prudente e Assis), onde valores de EVI acumulado são mais baixos. Nestas regiões a cana tem se expandido moderadamente nos últimos anos. *iii*) Noroeste paulista (São José do Rio Preto e Araçatuba) são regiões onde a conversão de pastagem para cana-de-açúcar tem sido muito intensa nos últimos anos, estas regiões apresentam bons níveis de EVI acumulado e menor variabilidade, com destaque para a região de São José do Rio Preto que é onde a atividade mais se expande no estado de São Paulo.

A Figura 4 mostra um mapa comparativo do acúmulo de EVI para dois anos-safra, sendo o de 2007/2008 considerado normal e o de 2013/2014 notadamente seco. Praticamente para o

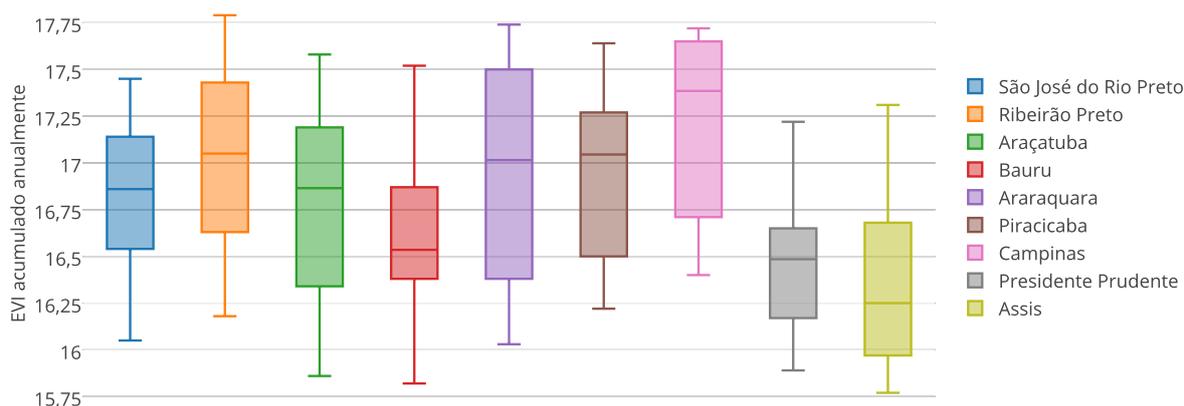


Figura 3: Boxplot de EVI acumulado por região entre 2004/2005 e 2013/2014.

estado inteiro, o EVI acumulado de 2013/2014 ficou muito abaixo do de 2007/2008, a exceção ocorreu na mesorregião de Ribeirão Preto, onde houve uma leve discrepância, apresentando baixo EVI acumulado para a safra de 2007/2008, como pôde ser observado na Figura 2, enquanto que todas as outras regiões se mantiveram em alta, mesmo caso de Presidente Prudente e Assis em 2004/2005.

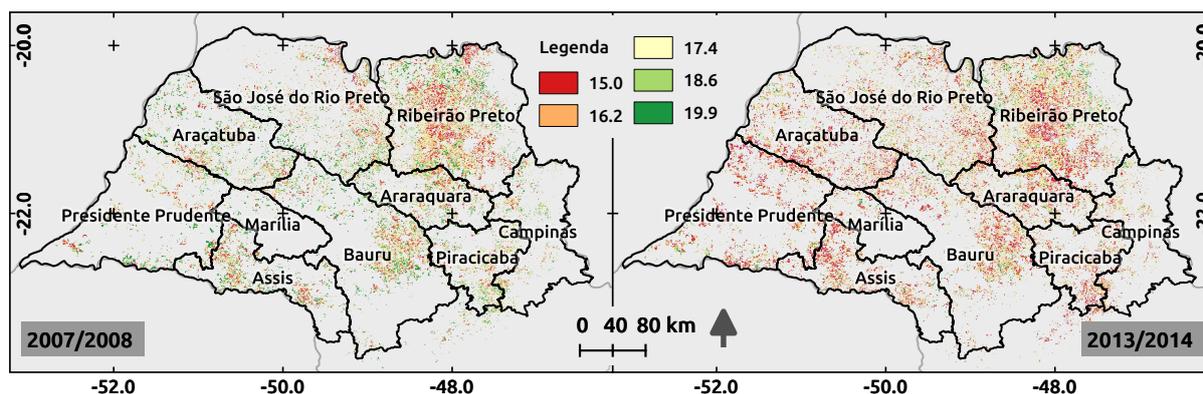


Figura 4: Mapas de EVI acumulado para dois anos-safra, 2007/2008 e 2013/2014.

### 3.3. Relação do EVI com a umidade do solo

A Figura 5 apresenta para as regiões de São José do Rio Preto, Bauru e Presidente Prudente, o comportamento mensal médio da umidade do solo, o reta do modelo de regressão da umidade e o EVI acumulado anual. Foram escolhidas estas três mesorregiões por apresentarem panoramas razoavelmente distintos entre si quanto à umidade do solo para os últimos anos, evitando assim um excesso de informações num mesmo gráfico. Como observado por Chen et al. (2014), o impacto da umidade do solo na vegetação é tão complexo que não pode ser caracterizado por simples análise de correlação ou explicado por um modelo simples. Ainda assim, ao observar as regressões lineares, foi possível notar uma tendência de queda que, na verdade, é fortemente influenciada pelos últimos dois anos. Dada a complexidade do sistema agrícola, limitações dos sensores e heterogeneidade das lavouras, não possível associar diretamente a baixa umidade do solo ao baixo EVI acumulado para a safra de 2013/2014. No entanto, a análise dos últimos dois anos-safra (2012/2013 para 2013/2014) na Figura 5 indica claramente uma queda nos níveis de umidade e também no EVI acumulado.

O fato mencionado é em parte corroborado pelas notícias em diferentes canais da mídia. A União da Indústria da Cana-de-açúcar (UNICA) divulgou em seu portal, um relatório referente à safra de 2013/2014, afirmando que embora a quantidade total de toneladas de biomassa tenha apresentado acréscimo para o estado de São Paulo, parte em função da expansão das áreas, a taxa de ATR (açúcar total recuperável) foi mais baixa. Conseqüentemente, a quantidade de açúcar e etanol produzido não acompanhou o de biomassa, tendo sido reduzida. Isso nos leva a levantar indícios de que a baixa umidade do solo já advinda do final do ano de 2013 possa ter comprometido a qualidade da cana produzida (UNICA, 2014b).

Numa notícia divulgada também pela UNICA, como parte dos relatórios de acompanhamento e prognóstico, o órgão afirma que a safra de 2014/2015 apresentará grande queda de produtividade, sendo o impacto em parte decorrente do ano de 2014 que se apresentou bastante desfavorável em termos de disponibilidade hídrica (até outubro, data de elaboração do presente artigo) (UNICA, 2014a).

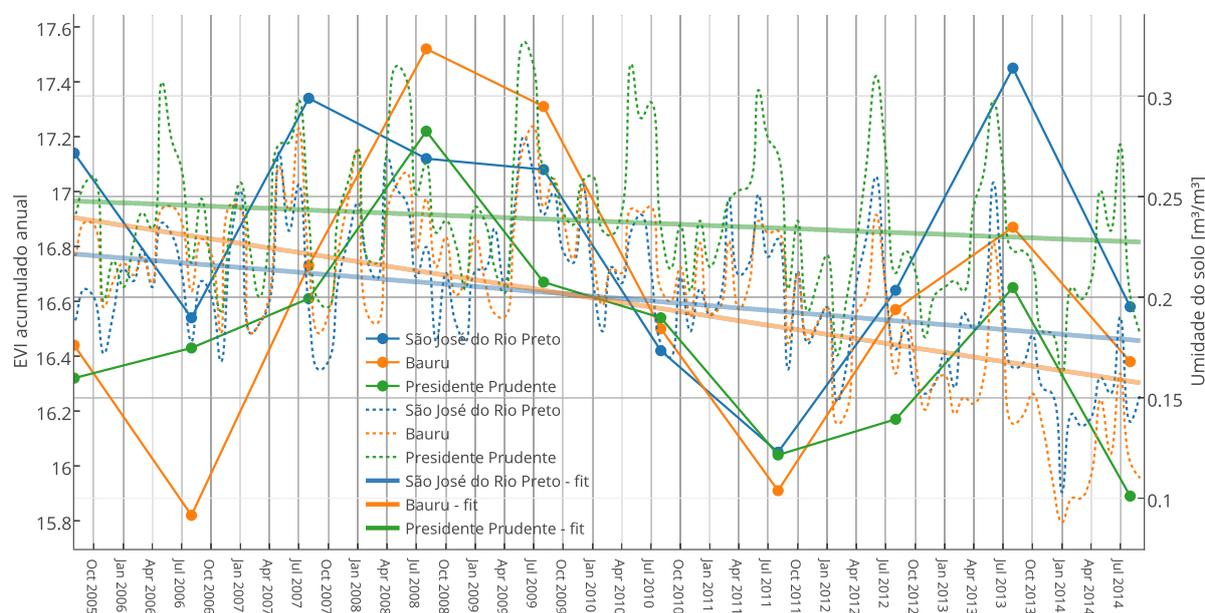


Figura 5: Umidade do solo em  $m^3/m^3$  (linha pontilhada), EVI acumulado (linha escura fina) e regressão linear da umidade (linha grossa e clara).

#### 4. Conclusões

O presente trabalho teve como principal objetivo analisar o comportamento das lavouras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo no período de 2003 a 2014. Para tal, foi estabelecida uma métrica baseada em EVI acumulado para possibilitar comparações no tempo (ano-safra) e espaço (mesorregião). Adicionalmente, foi analisada a umidade do solo estimada por radar orbital, de modo a verificar se esta variável tem efeito nas oscilações de EVI acumulado.

A análise do EVI médio por região ao longo de duas safras consecutivas permitiu identificar uma faixa de datas que separavam as safras. No caso da agricultura anual as janelas de plantio e colheita são bem definidas, porém, o caso da cana é muito mais complexo devido à existência de cana de ano e ano e meio. Sendo assim, foi identificado o dia juliano 249 como sendo o separador de safras, o que foi utilizado nos procedimentos posteriores.

Foi verificado que a oscilação de EVI acumulado entre as safras se manteve uniforme para todas regiões, indicando que os fatores ambientais influenciaram este indicador de forma consideravelmente homogênea no estado. Algumas exceções foram verificadas, de modo a

apresentarem valores aquém das outras regiões, a saber: Ribeirão Preto em 2007/2008 e Presidente Prudente e Assis em 2004/2005.

Os dados utilizados, principalmente os de umidade, apresentam sérias limitações quanto à resolução espacial, o que tende a dificultar a correlação entre fenômenos físicos. Relatórios divulgados pela UNICA contribuíram muito para entender e explicar o baixo desempenho para a safra 2014/2015, o que se alinha com a tendência de queda de umidade verificada.

As limitações instrumentais comprometeram consideravelmente a análise dos fenômenos físicos relacionados à produção agrícola. Porém, ainda assim, a umidade do solo estimada por sensoriamento remoto é um campo crescente e se apresenta como uma excelente ferramenta para avaliação de seca em agricultura. Acredita-se que, aliando umidade e reflectância (IVs), o caminho para se estimar biomassa em agricultura seja sobremaneira facilitado.

### Referências

CHEN, T. et al. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., v. 140, p. 330–338, jan. 2014. ISSN 00344257.

GAO, H. et al. Using TRMM/TMI to Retrieve Surface Soil Moisture over the Southern United States from 1998 to 2002. *Journal of Hydrometeorology*, v. 7, n. February, p. 23–38, 2006.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2, p. 195–213, nov. 2002. ISSN 00344257.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, v. 4, n. 1, p. 27–35, dez. 2013. ISSN 1758-678X. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate2056>>.

LOARIE, S. R. et al. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, v. 1, n. 2, p. 105–109, abr. 2011. ISSN 1758-678X.

MARIANO, D. A.; FOSCHIERA, W. *geopaitos-Python-RemoteSensing*. 2014. Disponível em: <<https://bitbucket.org/geopaitos/python-remotesensing>>.

REN, J. et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 10, n. 4, p. 403–413, dez. 2008. ISSN 03032434.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. *Remote Sensing*, v. 2, n. 4, p. 1057–1076, abr. 2010. ISSN 2072-4292.

SANTOS, W. J. R. et al. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma*, v. 221-222, p. 91–95, jun. 2014. ISSN 00167061.

UNICA. *Quebra agrícola se acentua e previsão de moagem diminui para 546 milhões de toneladas na região centro-sul*. 2014. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=80>>.

UNICA. *Relatório final da safra 2013 / 2014. Região Centro-Sul*. São Paulo, 2014. 32 p. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=88>>.