



RELAÇÃO ENTRE A RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRICOLAS E NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

RELATIONSHIP BETWEEN VEGETATION SPECTAL RESPONSE IN DIFFERENT AGRICULTURAL CROPS AND PHREATIC LEVELS IN A GUARANI AQUIFER SYSTEM RECHARGE AREA

Rodrigo Lilla Manzione¹, Diego Hiroshi Tanikawa², Bruna Camargo Soldera³

Artigo recebido em: 25/05/2013 e aceito para publicação em: 20/11/2013.

Abstract: Water availability in an aquifer depends on soil water infiltration and percolation in recharge areas. Several factors influence its dynamics. Different land uses are an example, influencing also infiltration and interception rates, as evapotranspiration. Facing the importance of recharge areas to aquifer maintenance and different land uses influencing its dynamics, the use of ancillary information on groundwater levels monitoring is an interesting alternative comparing with monitoring networks field implementations costs. The aim of this work was analyze the correlation between spectral response of agricultural crops and water table depths oscillation in monitoring wells located in a recharge area of the Guarani Aquifer System (GAS). Data from observed water table depths time series monitored at sugarcane and eucalyptus reforestation fields and EVI-2 (*Enhanced Vegetation Index-2*) time series from MODIS sensor were used. The results demonstrated that there is correlations between water levels oscillations and spectral behavior in large crop with seasonal cycles. The use of remote sensing products in groundwater prediction models can be explored when detected correlations between target variables of the study.

Keywords: Time series. Phreatic levels. Vegetation index. Monitoring.

Resumo: A disponibilidade hídrica de um sistema aquífero é mantida pela infiltração e percolação da água no solo nas áreas de recarga. Diversos fatores alteram essa dinâmica. Os diferentes usos e coberturas da terra são um exemplo, influenciando, inclusive, as taxas de infiltração e interceptação, bem como a evapotranspiração. Diante da importância das áreas de recarga para a manutenção dos aquíferos e da influência das diferentes coberturas vegetais na sua dinâmica, o uso de informações auxiliares no monitoramento dos níveis de águas subterrâneas se torna ferramenta interessante frente aos altos custos de implantação de redes de monitoramento. O objetivo de trabalho foi analisar a correlação entre a resposta espectral de duas culturas agrícolas e a oscilação dos níveis freáticos em poços de monitoramento localizados em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Foram utilizados dados de séries temporais dos níveis freáticos em poços sob o cultivo de cana-de-açúcar e eucalipto e séries temporais do índice de vegetação EVI-2 (*Enhanced Vegetation Index-2*) do sensor MODIS. Os resultados demonstraram que existe correlação entre as oscilações nos níveis freáticos e o comportamento espectral das culturas extensivas e ciclo sazonal. O uso de produtos de sensoriamento remoto em modelos de previsão em águas subterrâneas pode ser explorado quando detectadas correlações entre as variáveis alvo do estudo.

Palavras-chave: Séries temporais. Nível freático. Índice de vegetação. Monitoramento.

INTRODUÇÃO

A água doce desempenha diversas funções no sistema hídrico global como, por exemplo, a transferência de energia, ligações com o sistema climático e transporte de constituintes de diversos materiais. A utilização das águas subterrâneas surge como alternativa, fornecendo suporte à indústria, a agricultura e ao abastecimento urbano (VÖRÖSMARTY et al., 2004), além da manutenção de ecossistemas e da biodiversidade como

processos naturais, uma vez que correspondem a uma considerável porcentagem, cerca de 30%, de toda água doce disponível no planeta (SHIKLOMANOV, 1998). Entretanto, para que os aquíferos tenham disponibilidade hídrica, é necessário que ocorra a recarga, a partir da infiltração e percolação da água no solo (HEALY, 2010). A quantificação da recarga em águas subterrâneas pode ser definida como a combinação de diversos fato-

¹ UNESP/Ourinhos (manzione@ourinhos.unesp.br).

² UNESP/Ourinhos (tanikawa@hotmail.com).

³ UNESP/FCA-Botucatu (brusoldera@hotmail.com).

res, como geologia local, topografia, pluviosidade, evapotranspiração, porosidade, uso e cobertura da terra, entre outros. No caso do uso e cobertura da terra, suas variações alteram muito dos fatores que controlam a recarga, como a evapotranspiração, estrutura do solo, profundidade das raízes e interceptação (SCANLON et al., 2005; VAERET et al., 2009). Tais alterações modificam a taxa de recarga podendo levar a aumentos ou diminuições na altura do lençol freático.

No Brasil, os investimentos para a implantação, e principalmente para a manutenção, de redes de monitoramento são altos, devido à extensão continental do país. A criação de redes de monitoramento de águas subterrâneas nos estados brasileiros ainda é recente e em grande parte foram implantadas para controle de risco de contaminação, devido à grande exploração (MESTRINHO, 2008). Fontes de dados auxiliares, que não sejam diretamente referentes ao nível estático e/ou dinâmico de um poço ou parâmetros de qualidade dessas águas, mas que estejam relacionadas com essas informações podem ser utilizadas na análise quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas de uma determinada região. Produtos de sensoriamento remoto, por exemplo, são uma alternativa para fornecer informações sobre a dinâmica da recarga em aquíferos devido a sua grande cobertura espacial e alta resolução temporal. A missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) é um exemplo: compõe-se de dois satélites que fornecem informações sobre mudanças de gravidade causadas por variações na distribuição de massa da superfície da Terra e pela deformação da Terra sólida em resposta a estas variações de massa. Bomfim e Molina (2009) utilizaram os coeficientes de Stokes fornecidos pela missão GRACE para analisar a variação dos elementos do campo de gravidade na região do Sistema Aquífero Guarani (SAG), no período de abril de 2002 a julho de 2004. Dados de monitoramento de mudanças no uso e cobertura da terra como os fornecidos pelo sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) possuem uma alta resolução temporal, fornecendo informações da mesma área diariamente, permitindo a geração de imagens compostas pelos melhores pixels a cada 16 dias.

Aplicativos e ferramentas computacionais disponíveis na internet (FREITAS et al., 2011) fornecem gratuitamente, informações que permitem a visualização instantânea de séries temporais de índices de vegetação elaborados a partir de imagens de sensoriamento remoto, como o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), que permite acompanhar o desenvolvimento da vegetação em fun-

ção da sua resposta espectral. Dados espectrais de sensores remotos e satélites tem sido utilizados em programas de monitoramento de culturas agrícolas como café (MOREIRA et al., 2004), cana (RUDORFF et al., 2010), soja (RUDORFF et al., 2011), além do programa de desmatamento da Amazônia (INPE, 2008). Nesse contexto, a avaliação das mudanças no uso e cobertura da terra pode apresentar correlação com a oscilação do nível freático e fornecer informações que auxiliem nas tomadas de decisões a respeito da gestão das águas subterrâneas.

O objetivo deste trabalho foi analisar a relação entre a oscilação dos níveis freáticos em área de recarga do SAG observados em poços de monitoramento e séries temporais do EVI-2/MODIS de diferentes culturas agrícolas (cana-de-açúcar e eucalipto) presentes na Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas-SP, procurando compreender diferentes comportamentos do sistema hídrico em função do desenvolvimento da vegetação.

O sensor MODIS

O sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) é o principal instrumento dos satélites Terra e Aqua do programa EOS (*Earth Observation System*), liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e com a participação de diversas nações, para o estudo de mudanças globais (SOARES et al., 2007). O projeto iniciou-se em 1999 com o lançamento do Terra, seguido pelo lançamento do Aqua, em 2002. O sensor foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera, nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético, com alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais no intervalos de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas (bandas 1 e 2) são adquiridas com 250 m de resolução espacial, cinco bandas (bandas 3 a 7) com resolução de 500 m e as bandas restantes (bandas 8 a 36) com resolução de 1 km. Com varredura de 55° para cada lado a uma órbita de 705 km de altura, o sensor tem a capacidade de imagear uma faixa de 2.330 km, cobrindo totalmente a terra a cada 2 dias. A vida útil projetada desses satélites foi de 6 anos, mas se mostraram bem mais robustos, superando as expectativas iniciais. Vale salientar que o MODIS é apenas um sensor a bordo desses satélites, que possuem também outros sensores, com diferentes propósitos e países de origem.

A seleção das bandas MODIS foi feita para observação de feições das propriedades das

nuvens e sua dinâmica, das propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e da temperatura da superfície dos oceanos do mundo. Segundo Soares et al. (2007), as características dessas bandas permitiram o desenvolvimento inicial de 44 produtos MODIS padrão para calibração, atmosfera, continente, criosfera e oceanos. Esse sensor apresentou inovações substanciais em relação a seus predecessores quanto a qualidade dos detectores e no sistema de imageamento, aumento no número de bandas espectrais e processamento dos dados com algoritmos específicos para geração de produtos de alta qualidade e correção atmosférica, radiométrica e geométrica. Justamente a qualidade geométrica dos dados é que permite o monitoramento preciso de alterações na superfície da Terra (HUETE et al., 2002). Sem dúvida a política de distribuição gratuita dos produtos MODIS também contribuiu bastante para sua popularização e disseminação rápida entre os usuários de sensoriamento remoto.

Produtos MOD13

A reunião de dados do sensor MODIS na forma de produtos foi uma iniciativa para facilitar seu uso nas diversas áreas de aplicação do sensoriamento remoto, fornecendo imagens corrigidas

na forma de índices de vegetação, índices de área foliar, entre outros (LATORRE et al., 2007). Os produtos MODIS para ecossistemas terrestres são chamados MODLAND, reunindo produtos relacionados ao balanço de energia, à vegetação e a cobertura terrestre (JUSTICE et al., 2002). O produto MOD13 (*Gridded Vegetation Indices – Maximum NDVI – Normalized Difference Vegetation Index and integrated MVI – Maximum Vegetation Index*) oferece grades de índice de vegetação (Máximo NDVI e MVI integrados) com resolução espacial de 250 m e resolução temporal de 16 dias. O MOD13 contém os índices de vegetação NDVI e EVI (*Enhance Vegetation Index*), sendo o NDVI mais sensível à presença de clorofila e o EVI à estrutura do dossel, arquitetura e fisionomia das plantas e índice de área foliar (HUETE et al., 2002). Após o lançamento dos dois sensores MODIS (Terra e Aqua), o EVI foi adotado como um produto padrão pela NASA e tornou-se extremamente popular entre os usuários, devido à sua capacidade de eliminar ruídos de fundo e atmosfera, bem como a sua não saturação, um problema típico do NDVI (HUETE et al., 2002). O cálculo do EVI utiliza imagens MODIS do produto MOD13, coleção 005, segundo a seguinte fórmula (JUSTICE et al, 1998):

$$EVI = G \cdot (IVP - Vermelho) / (L + IVP + C1 \cdot Vermelho - C2 \cdot Azul) \quad (1)$$

Onde: G = fator de ganho, IVP = banda do infravermelho próximo, L = fator de ajuste do solo, C1 e C2 = coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera. No caso, os valores utilizados para o EVI são G = 2,5; L = 1; C1 = 6; C2 = 7,5 (JUSTICE et al., 1998).

Em virtude de problemas com a banda do azul que frequentemente apresentava sinal pobre, foi desenvolvido o índice EVI-2 (JIANG et al., 2008). A formulação é a mesma, excluindo o fator da banda azul e adotando os valores de G = 2,5; L = 1; C1 = 2,4. Este índice apresenta resultados semelhantes ao EVI, variando entre os valores 0 (vegetação menos densa) e 1 (vegetação mais densa), e foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de propiciar o monitoramento da vegetação a partir de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (LATORRE et al., 2007). Atualmente, dados

EVI/MODIS são distribuído gratuitamente pelo Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) do Serviço Geológico Americano USGS (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod13q1).

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Ribeirão da Onça localiza-se na região do município de Brotas-SP (Figura 1), ao centro-norte do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' longitude oeste, com uma área total de aproximadamente 6.500 ha. O clima, baseando-se na classificação de Köppen, é definido como Subtropical Úmido (Cwa), com presença de chuvas de verão (dezembro a março), variando para Tropical Úmido com inverno seco (junho a agosto), apresentando precipitação acumulada anual entre 1300 mm e 1400 mm, em média.

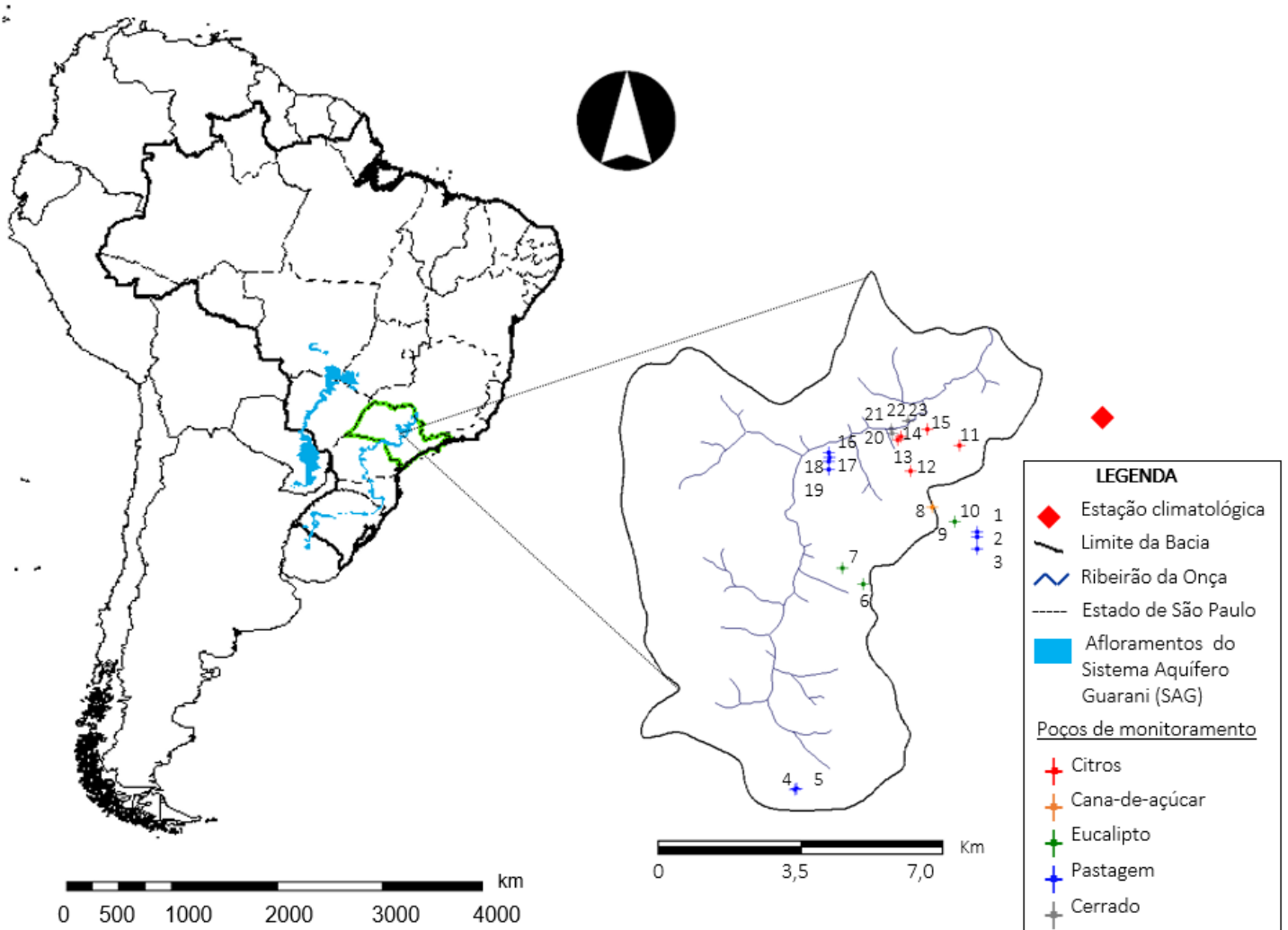


Figura 1 - Localização da área de estudo e Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas-SP
Figure 1 - Study area location and Onça Creek watershed, Brotas-SP, Brazil

Geologicamente, grande parte da bacia apresenta características da Formação Botucatu (arenitos), enquanto que no exutório varia para um Complexo Botucatu-Diabásio (com sills de diabásio), ambas pertencentes ao Grupo São Bento, datado do Mesozóico (BARRETO, 2006). Assim, uma característica importante desta bacia é situar-se quase inteiramente nas regiões de afloramento da Formação Botucatu, área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), no qual as chuvas de verão auxiliam na elevação dos níveis freáticos. As regiões de afloramento são estratégicas para a sustentação do aquífero no sentido de entender e avaliar a quantidade em a recarga ocorre (WENDLAND et al., 2007).

A região está fortemente sujeita a utilização econômica, sendo considerada como um polo de papel/celulose e laranja, devido à proximidade em relação às indústrias processadoras e ao preço baixo das terras, que são muitas vezes arrendadas. Em consequência, possui intensa atividade agrícola-

la e pecuária, com sucessivos plantios de eucalipto, citros, soja, cana-de-açúcar e criação de gado (para produção de leite e abastecimento de frigoríficos da região de Piracicaba, Bauru, Ribeirão Preto e Lençóis Paulista, por exemplo). Mesmo assim ainda restam alguns remanescente da cobertura original de cerrado. Nas áreas da Bacia do Ribeirão da Onça onde ocorre irrigação das plantações de citros, a captação é feita diretamente no ribeirão.

Assim, a bacia está exposta a mecanismos potenciais de contaminação e a interferências nos processos de recarga decorrentes dos efeitos do desenvolvimento das culturas agrícolas sobre áreas que, teoricamente, serviriam para receber a água infiltrada para recarga direta do aquífero. A relação entre a dinâmica dos cultivos agrícolas e a recarga do SAG em associação com a precipitação e as características geológicas do aquífero, pode fornecer elementos de interesse para o aprofundamento dos conhecimentos a respeito do

comportamento do lençol freático em função dos diferentes usos do solo na região.

METODOLOGIA

Dados disponíveis

Para verificar a relação entre séries de monitoramento de nível freático sob diferentes usos da terra e séries de índice de vegetação fornecidos pelo sensor MODIS foram utilizados os seguintes dados:

Séries temporais EVI-2/MODIS

Os dados de precipitação e EVI-2 foram obtidos gratuitamente no site do Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta (<<https://www.dsr.inpe.br/laf/series>>) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) a partir de dados do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), quanto à precipitação, e do sensor MODIS quanto ao EVI-2, ambos fornecidos pela NASA (National Aeronautics and Space Administration dos Estados Unidos da América). Nas séries de precipitação, o pixel TRMM tem uma área mínima de aproximadamente de 0,25 graus, sendo o gráfico da série temporal de precipitação formado por 1 pixel. As séries temporais do índice EVI-2 representam a variação dos valores do índice ao longo do tempo sobre o pixel selecionado pelo usuário no globo virtual sob o aplicativo Google Maps. Nos gráficos fornecidos, a série em azul no gráfico EVI-2 (sem filtro) representa os valores brutos observados em 1 pixel nas imagens MODIS ao longo do tempo. Essa série foi filtrada utilizando informações de ângulo de visada do sensor, refletância de banda espectral e data da observação do pixel. A série em vermelho (com filtro) é resultado de uma suavização da série em azul utilizando a transformada *wavelet* (FREITAS et al., 2011). O objetivo do portal é facilitar o acesso público e gratuito a séries temporais de dados MODIS, fornecendo para o pixel selecionado valores de EVI-2 mínimos, máximos, médios, medianos, variância e total acumulado para cada ano monitorado, totalizando de 23 dados por ano.

Séries de monitoramento de oscilação dos níveis freáticos

A Bacia do Ribeirão da Onça possui 23 piezômetros para monitoramento dos níveis freáticos, os quais foram observados com uma frequência quinzenal. Foram selecionados dois poços em diferentes usos da terra ao longo da bacia: cana-de-açúcar e reflorestamento com eucalipto. Essas culturas foram selecionadas propositalmen-

te para comparar o comportamento do lençol freático sob diferentes usos da terra por culturas agrícolas extensivas, e também por estarem localizados próximos ao centro do pixel EVI-2 (250 x 250 metros), evitando assim interferências de outras vegetações no entorno do poço de monitoramento. Os dados de oscilações dos níveis formam uma série com início em abril de 2004, analisados até outubro de 2012. Esses dados foram interpolados usando um modelo de séries temporais em tempo contínuo chamado modelo PIRFICT, conforme descrito em Manzione et al. (2012) para que houvessem medidas disponíveis para todos os instantes temporais. Esse modelo reconstrói séries de oscilação de níveis amostradas em intervalos irregulares, interpolando os valores entre observações baseados em funções de impulso e resposta que simulam a relação dinâmica entre diferentes variáveis de entrada como precipitação e evapotranspiração e as variações dos níveis, reproduzindo condições hidrogeológicas locais. Foram utilizadas séries temporais de precipitação e evapotranspiração potencial aferidas a partir de estações de superfície na calibração do modelo de séries temporais aos dados de observação dos níveis, conforme descrito em Von Asmuth et al. (2008). Essas séries foram obtidas na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP), localizada a 1,5 km da bacia. Os dados climáticos disponíveis na estação formam uma série temporal com início em 1974. Ressalta-se que a aplicação desse modelo se restringe a aquíferos livres, assim como a aplicação dessa metodologia como um todo.

Análises da correlação entre as séries temporais

Com a coordenada geográfica de cada um dos poços de monitoramento selecionados, fez-se a pesquisa da respectiva série EVI-2 para a localidade. Primeiramente, realizou-se uma inspeção visual nas séries para verificar se os padrões sazonais da resposta espectral das culturas eram compatíveis com os padrões da precipitação e da oscilação dos níveis freáticos em cada poço e, posteriormente, foi feita uma análise de correlação linear entre os dados. Na análise de correlação foram cruzados dados de EVI-2 médios, mínimos e máximos com as alturas média, mínima e máxima do lençol freático para cada ano do período monitorado, buscando verificar as relações existentes entre os dados. Os valores dos níveis freáticos médios, mínimos e máximos calculados para cada ano de estudos foram obtidos usando somente os valores observados durante o monitoramen-

to, conforme descrito em Knotters e Van Walsun (1997). Utilizaram-se gráficos de dispersão e coeficiente de correlação de Pearson.

Uma vez calculados os coeficientes de correlação, ajustou-se um modelo de regressão polinomial (LANDIM, 1998), tendo os dados das séries temporais de EVI-2 como variáveis explicativas para predição de alturas dos níveis freáticos. A qualidade dos ajustes foi medida pelo coeficiente de determinação da reta ajustada por mínimos quadrados ordinários (NETER et al., 1996).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da correlação entre as séries EVI-2 e as séries de monitoramento de nível freático calibradas foi feita inicialmente por intervalos de tempo, tendo a precipitação como parâmetro comum, uma vez que a quantidade de chuva considerada para o período foi a mesma para as duas localidades dos dois poços. A precipitação considerada para a área medida pelo satélite TRMM pode ser vista na Tabela 1.

Dinâmica do nível freático em área com cultivo de cana-de-açúcar

O área do poço 8, localizado próximo ao limite da bacia, teve como uso da terra a cultura do citros até o início de 2006, sendo posteriormente alterado para cana-de-açúcar. Algumas áreas da bacia, como essa, foram descontinuadas com cultivo de citros em função da conjuntura econômica (baixos preços) e problemas fitossanitários (incidência de *Greening*), por exemplo. Na Figura 2 é possível visualizar as séries temporais de EVI-2/MODIS, de precipitação e oscilação dos níveis freáticos durante o período de abril de 2004

a outubro de 2012.

Tabela 1 - Precipitação anual na Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas/SP para o período de abril de 2004 a outubro de 2012 fornecidos pelo satélite TRMM

Período	Precipitação (mm)
2004*	1559
2005	1658
2006	1502
2007	1366
2008	1406
2009	2124
2010	1470
2011	1791
2012**	1230
Média***	1562

* A partir de abril de 2004

** até outubro de 2012

*** média dos totais dos anos de 2004 a 2012

Enquanto o cultivo era feito com citros, os valores de EVI-2 oscilavam pouco, já que a cultura era fertirrigada. Na Tabela 2 são apresentados os valores anuais mínimos, máximos e médios do índice EVI-2 para cada ano em estudo. Em 2004 e 2005 os valores médios foram inferiores que nos anos subsequente, exceção feita a 2011 e 2012. A amplitude de variação entre valores máximos e mínimos do EVI-2 foi maior sob o cultivo de cana-de-açúcar, uma vez que havendo corte da cultura uma vez ao ano, os níveis chegam a valores mais baixos, enquanto que sob cultivo de citros, mesmo em épocas de déficit hídrico a cultura era suplementada com água via irrigação por gotejamento.

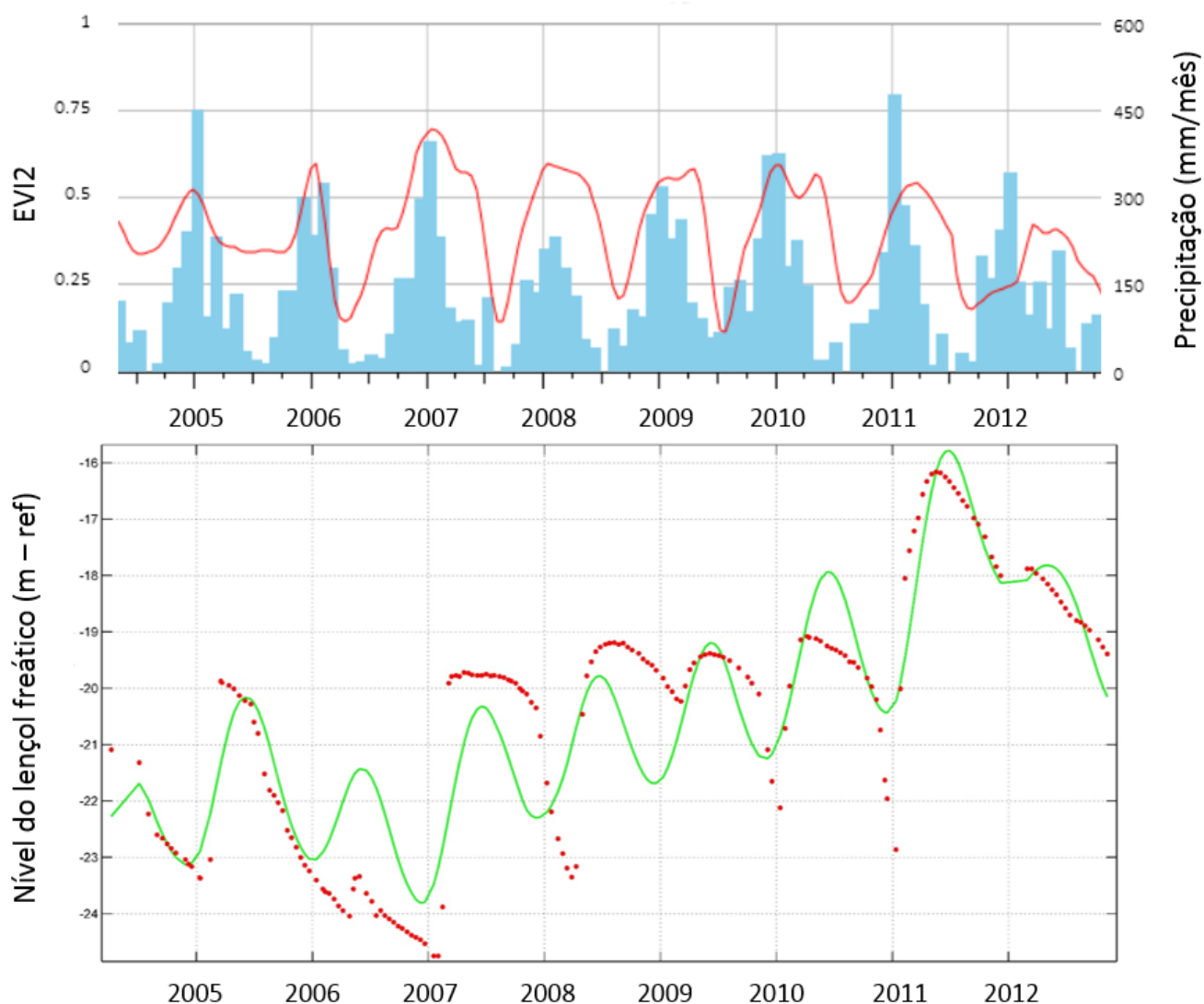


Figura 2 - Série temporal de EVI-2, precipitação e valores do nível freático observado (pontos vermelhos) calibrados pelo modelo PIRFICT (linha verde) sob cultivo de cana-de-açúcar entre abril de 2004 e outubro de 2012

Figure 2 - EVI-2 time series, rainfall and observed groundwater level (red points) calibrated by the PIRFICT model (green line) at sugarcane crop between April 2003 and October 2012

Tabela 2 - Valores anuais mínimos, máximos e médios de EVI-2 na área próxima ao poço 8

Table 2 - Annual minimum, maximum and mean EVI-2 values in the area near well 8

Valor	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Mínimo	0,34	0,34	0,14	0,15	0,21	0,11	0,20	0,18	0,16
Máximo	0,52	0,53	0,66	0,70	0,60	0,59	0,60	0,54	0,43
Media	0,40	0,39	0,39	0,47	0,46	0,42	0,40	0,37	0,32

Também deve-se considerar a interferência do solo na resposta do EVI-2 devido ao arramento e divisão dos talhões na cultura do citros. Com o corte do citros houve uma queda no EVI-2, já que não havia resposta por vegetação e, posteriormente, a partir de 2007, percebe-se um comportamento sazonal na série de dados. Os picos de EVI-2 coincidem com os períodos mais chuvosos.

Nesse comportamento da série de EVI-2 também estão os efeitos do corte e rebrota da cana, com ciclo de 1 ano na área e uma renovação no canal após a colheita em setembro de 2011.

Se comparadas essas séries de dados de EVI-2 e de chuva às séries de nível freático percebe-se um atraso entre o pico de chuva e de EVI-2 em relação ao nível mais elevado do lençol em

cada ano. Mesmo em períodos de elevação ou rebaixamento do nível freático, verifica-se um comportamento sazonal nas séries de oscilação dos níveis e de EVI-2, devido as variações climáticas interanuais. Essa defasagem entre os pulsos de precipitação e o tempo de resposta da oscilação dos níveis foi detectada nos estudos de Manzione et al. (2012), que analisaram as séries de observação dos níveis usando as funções de impulso e resposta calibradas pelo modelo PIR-FICT. Os níveis freáticos também podem se elevar mesmo quando o EVI se mostrar baixo, isso devido ao corte da cana-de-açúcar que facilita a infiltração e conseqüentemente a recarga. Quando a cana-de-açúcar desenvolve seu dossel a interceptação, a evapotranspiração e o consumo da água pela planta interferem na recarga, resultando em níveis mais profundos. Segundo Smith et al. (2005), o exuberante sistema radicular da cana-de-açúcar tem 90% de seu desenvolvimento nos primeiros 3 metros do solo, interceptando grande parte da água que infiltra no solo e dificultando a percolação. Da mesma forma, suas raízes mais profundas podem chegar a dezenas de metros, mas são para fixação, não utilizando águas muito profundas e sendo pouco influenciadas pelo fluxo regional do aquífero.

Os níveis freáticos passam por uma tendência de elevação a partir de 2007 devido à grande quantidade de chuvas incidentes na bacia até 2011. Entre agosto de 2008 e julho de 2010 não houve meses sem registros de chuva na bacia, totalizando 3694,2 mm no período. Durante o ano de 2009 choveram 2124 mm na bacia, 562 mm a mais que a média do período em estudo. Isso fez com que os níveis, apesar de continuar apresentando padrões sazonais, fossem se elevando e passando a flutuar entre 19 e 20 metros de profundidade na maior parte do tempo entre 2007 e 2011. No ano de 2011 foram registrados 1791 mm de chuva, fazendo com que a tendência de elevação se intensificasse, apresentando uma elevação de 7 metros no ano e chegando a 16 metros de profundidade. A intensificação desse processo também se deveu à renovação do canal, preparo do solo, subsolagem, aração e gradagem pela qual a área passou. A partir do meio de 2011 os níveis apresentam uma tendência de queda pela diminuição da intensidade das precipitações, mas os níveis permanecem acima dos 19 metros como no início de 2007. A média do índice EVI-2 para o pixel que contém o poço 8 foi de 0,40 durante todo o período de análise.

Dinâmica do nível freático em área com cultivo de eucalipto

Da mesma forma que no poço anterior, a série EVI-2 no poço 9 apresentou comportamento sazonal, com picos muitas vezes coincidindo com os períodos de maior chuva (Figura 3). Entretanto, pela resposta da vegetação à precipitação percebe-se que a cultura do eucalipto é menos sensível a variações climáticas sazonais do que a cultura da cana-de-açúcar. Os níveis freáticos apresentaram uma queda superior a 6 metros entre abril de 2004 e o começo de 2007. Após esse período verificou-se uma elevação em virtude das chuvas de verão, potencializada pelo corte das árvores no final de 2007. Os valores de EVI-2 atingem 0,20 no início de 2008 (Tabela 3). Antes disso o dossel do reflorestamento já estava formado e fechado, enquanto em 2008 o solo exposto e a falta de vegetação impõem valores reduzidos de reflectância espectral como percebe-se nos valores dos índices. Por ser o primeiro corte, as árvores ainda permaneceram a campo para rebrota e novo ciclo de cultivo. O sistema radicular não interfere nos níveis uma vez que a falta da parte aérea da planta faz com que não haja evapotranspiração, sendo pequena a parcela da água consumida pela planta nesse período para que ocorra a rebrota e inicie-se um novo ciclo de desenvolvimento. No final de 2008 o eucalipto já começava a rebrotar, como revelam os valores de EVI-2, mas o nível freático ainda continuava a se elevar. Tal fato pode estar relacionado ao armazenamento da água no solo, proveniente do período com pouca cobertura vegetal, no qual se permitiu a infiltração de uma maior quantidade de água, comparativamente aos outros períodos. Os valores de EVI-2 voltaram a se estabelecer acima de 0,5 apenas 15 meses depois. Nos períodos onde as árvores estão com sua parte aérea desenvolvida, os valores de EVI-2 variam pouco, com valores entre 0,39 e 0,59. Em 2008 a variação se deu mais acentuada em função do corte, apresentando o menor valor médio. Com o corte da floresta, aliado ao período chuvoso de agosto de 2008 a julho de 2010, verificou-se uma subida dos níveis superiores a 7 metros, sofrendo uma pequena queda no inverno de 2010. Com o desenvolvimento da floresta de eucalipto e a diminuição da quantidade de água presente na zona vadosa, parte devido a percolação em direção as reservas permanentes do aquífero e parte relativa ao consumo pela cultura, notou-se novamente um rebaixamento dos níveis, desta vez de 1 metro em, aproximadamente, 1 ano e meio. No final de

2010, verifica-se que o EVI-2 da cultura voltou a cair (atinge o pico mínimo por volta de novembro/dezembro) e, algum tempo depois se observa elevação no nível freático. Esta queda nos níveis é seguida pela precipitação acumulada do verão 2010/2011, a maior do período de monitoramento (1299 mm), verificando-se a elevação dos níveis freáticos em mais de 3 metros. Apesar disso, os valores de EVI-2 no verão de 2010/2011 não superaram os valores máximos encontrados em 2009 e 2010. A partir de 2009 o comportamento da série de EVI-2 é novamente pouco variante no tempo.

Os valores máximos de EVI-2 durante esse período chuvoso chegaram a 0,71 em 2010, mas com pequenas amplitudes se comparada a cana-de-açúcar. A média do índice EVI-2 para o pixel que contém o poço 9 foi de 0,51 durante todo o período de análise. Esse valor foi superior à média calculada para a cana-de-açúcar em função das diferenças fisionômicas e morfológicas entre das plantas, diferentes arquiteturas dos dosséis e colheita da cana-de-açúcar que remove a vegetação anualmente e reduz os valores do índice em determinados períodos.

Tabela 3 - Valores anuais mínimos, máximos e médios de EVI-2 na área próxima ao poço 9
Table 3 - Annual minimum, maximum and mean EVI-2 values in the area near well 8

Valor	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Mínimo	0,45	0,41	0,39	0,25	0,20	0,57	0,46	0,46	0,50
Máximo	0,63	0,59	0,49	0,51	0,55	0,70	0,71	0,64	0,82
Media	0,55	0,50	0,45	0,45	0,28	0,60	0,60	0,58	0,60

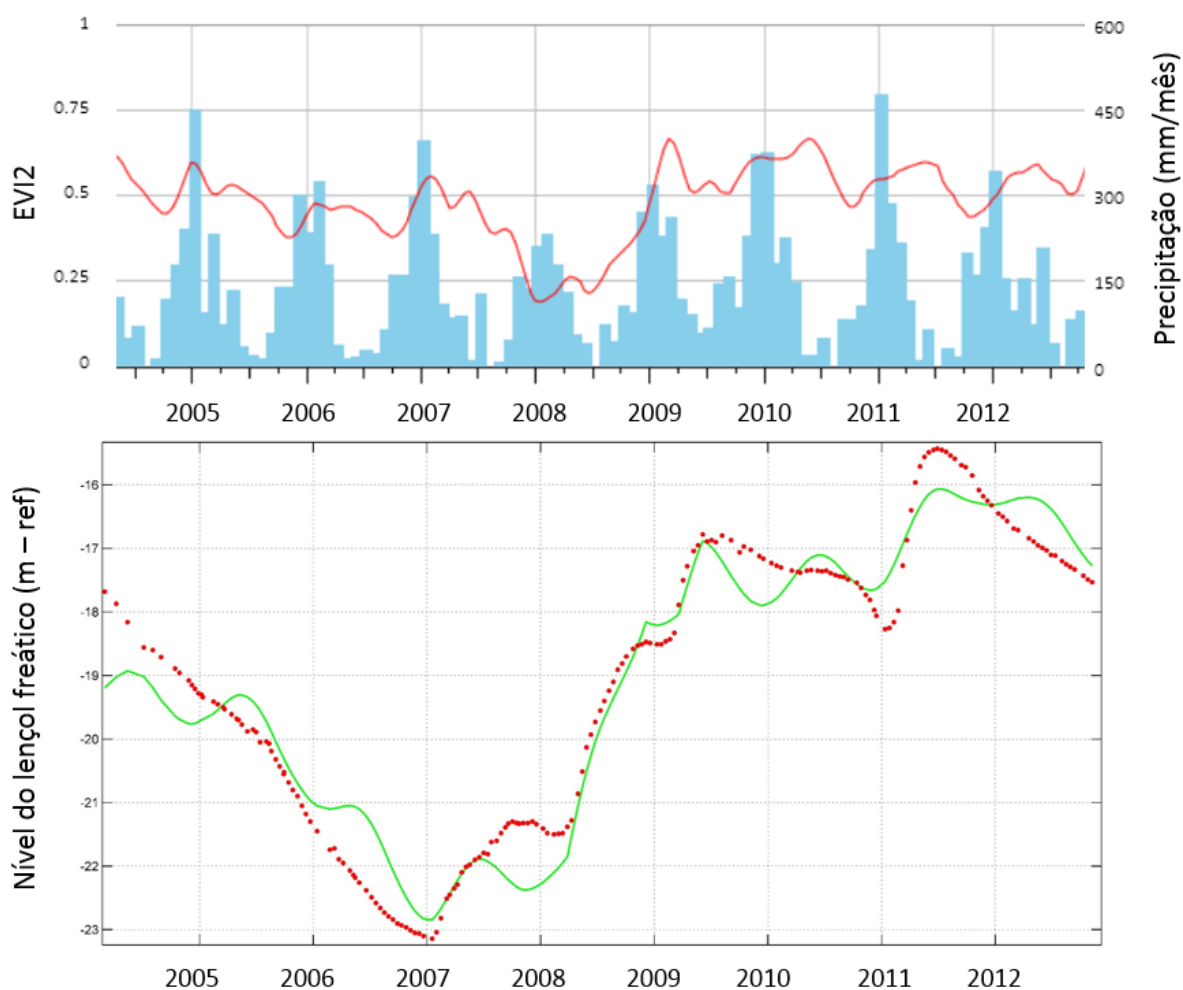


Figura 3 - Gráfico da série temporal de EVI-2, precipitação e valores do nível freático observado (pontos vermelhos) calibrados pelo modelo PIRFICT (linha verde) sob reflorestamento com eucalipto entre abril de 2004 e outubro de 2012

Figure 3 - EVI-2 time series, rainfall and observed groundwater level (red points) calibrated by the PIRFICT model (green line) at eucalyptus reforestation between April 2003 and October 2012

Correlação entre dados de monitoramento do nível freático e séries EVI-2

Para analisar estatisticamente a correlação entre as séries do índice EVI-2 e as séries de monitoramento de nível freático utilizaram-se os dados de valores máximos anuais de EVI-2 por serem considerados como dados com melhores respostas espectrais da cultura para cada período do ano.

A correlação entre os valores máximos das séries de EVI-2 do período estudado e os níveis freáticos mínimos calculados a partir dos dados de monitoramento na área de cana-de-açúcar pode ser vista na Figura 4. O coeficiente de correlação calculado foi de -0,78 (Tabela 4), mostrando que os níveis freáticos estão mais superficiais em momentos em que o EVI-2 é mais baixo. Isso é explicado pelo terreno se tornar mais propício a infiltração após a colheita da planta, favorecendo a recarga e elevando os níveis de água subterrânea. Níveis esses que se apresentam mais profundos com o desenvolvimento da parte aérea e fechamento do dossel da planta de cana-de-açúcar, que intercepta, consome e evapotranspira a maior parte da água precipitada. Outra prática que deve ser mencionada é a colheita mecanizada da cana-de-açúcar na área, já que os restos cultu-

rais pós-colheita, segundo Barcellos et al. (1999), diminuem a energia cinética da precipitação, contribuindo para o não-selamento superficial do solo, permitindo maior infiltração da água.

Em função dessa correlação foi ajustado o modelo de regressão polinomial para explicar as oscilações de nível em função do EVI-2. A determinação da reta ajustada aos dados no gráfico de dispersão foi de $R^2 = 0,62$ demonstrando que existe uma relação entre os níveis freáticos observados e os índices de vegetação estabelecidos.

Na Figura 5 é apresentada a correlação entre os valores máximos das séries de EVI-2 do período estudado e os níveis freáticos mínimos calculados a partir dos dados de monitoramento na área de reflorestamento com eucalipto. O coeficiente de correlação calculado foi de 0,90 conforme apresentado na Tabela 4, indicando uma forte correlação entre níveis freáticos e a vegetação. Os valores de EVI-2 são menores em momentos em que os níveis freáticos estão mais profundos, ou seja, a medida que os níveis freáticos sobem, a vegetação fica mais vigorosa e a resposta espectral é mais evidente.

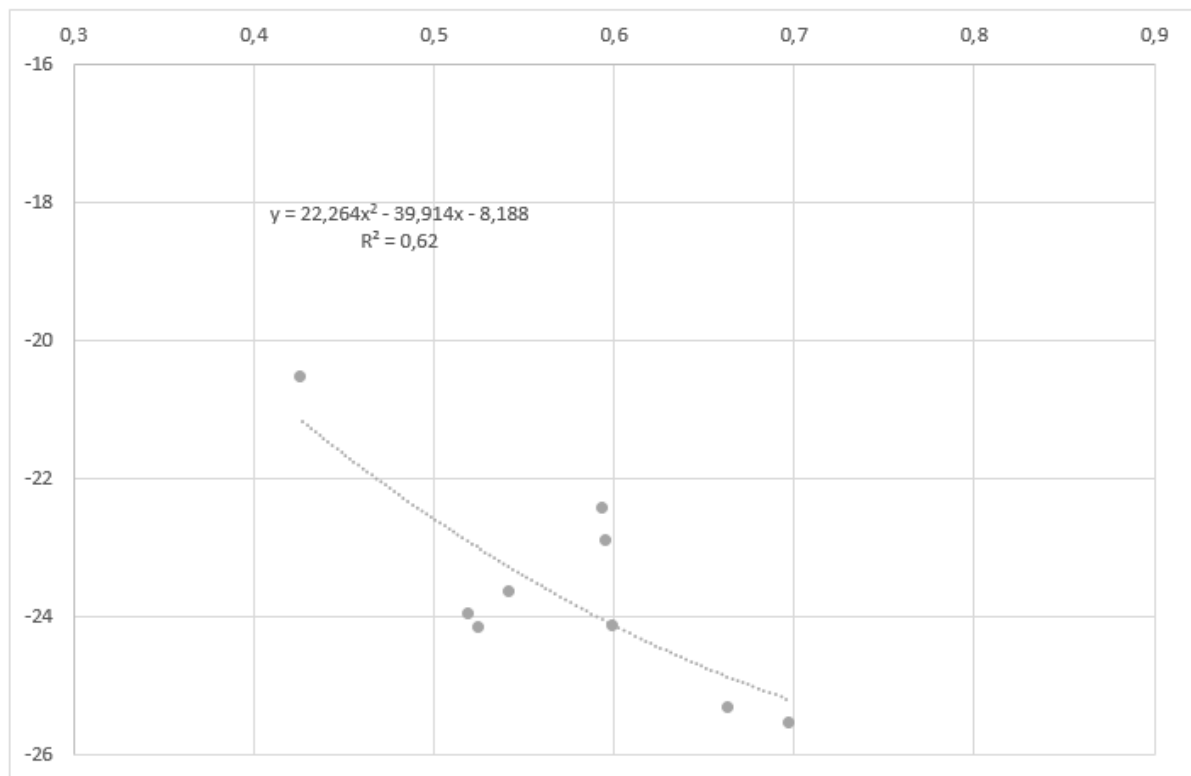


Figura 4 - Correlação entre valores de EVI-2 máximos (-) e níveis freáticos mínimos (metros) sob cultivo de cana-de-açúcar registrados entre abril de 2004 e outubro de 2012

Figure 4 - Correlation between EVI-2 maximum values (-) and minimum phreatic levels (meters) at sugarcane crop registered from April 2004 to October 2012

Tabela 4 - Estatísticas calculadas a partir da correlação entre os valores anuais das séries temporais de EVI-2 e níveis freáticos observados entre abril de 2004 e outubro de 2012

Table 4 - Statistics calculated from the correlation of annual values of EVI-2 time series and observed phreatic levels between April 2004 and October 2012

Poço ID	Uso agrícola da Terra	Correlação (ρ) Nível x EVI-2	Modelo de regressão polinomial ajustado	Coefficiente de determinação (R^2)
8	Cana-de-açúcar	- 0,78	$y = 22,3x^2 - 39,2x - 8,2$	0,62
9	Eucalipto	0,90	$y = -71,8x^2 + 111,9x - 62,1$	0,93

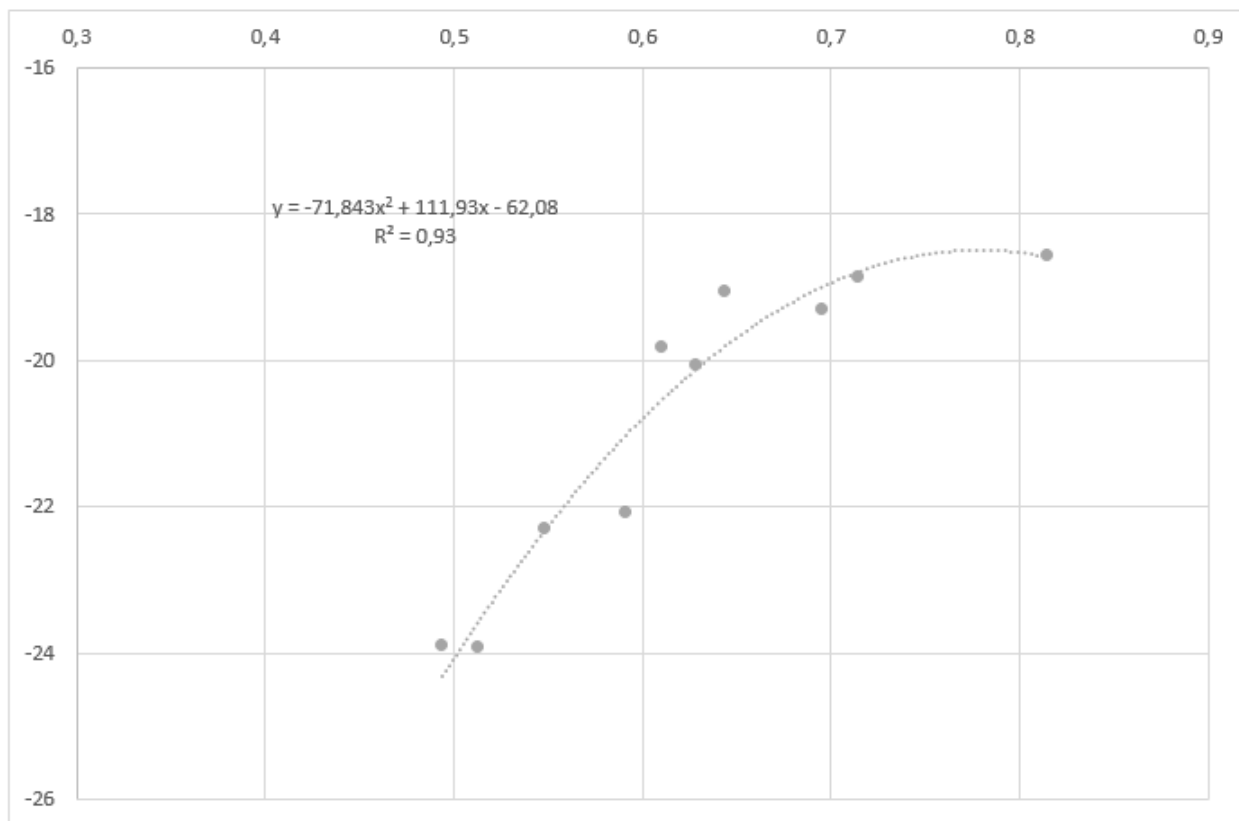


Figura 5 - Correlação entre valores de EVI-2 máximos (-) e níveis freáticos mínimos (metros) sob reflorestamento com eucalipto registrados entre abril de 2004 e outubro de 2012

Figure 5 - Correlation between EVI-2 maximum values (-) and minimum phreatic levels (meters) at eucalyptus reforestation registered from April 2004 to October 2012

Esse comportamento distinto entre as duas culturas demonstra que a cana-de-açúcar interfere na recarga, uma vez que nos momentos quando o nível de água é mais profundo são justamente os que a vegetação responde melhor ao índice EVI-2. No eucalipto é a recarga que interfere na planta, dependente muito mais do fluxo local e regional do que da precipitação. Segundo Le Maitre et al. (1999) plantações de eucalipto exploram profundidades superiores a 15 metros, dependendo muito mais do fluxo subterrâneo do que da recarga direta. Assim, como visto na Figura 5, a medida que os níveis vão se tornando mais superficiais, os valores do EVI-2 vão aumentando, denotando

essa reposição da planta à oferta hídrica em elevação. Mesmo assim a planta continua consumindo boa parte da água que infiltra e percola, visto as quedas nos níveis principalmente no final do primeiro ciclo produtivo da floresta entre abril de 2004 e o começo de 2007.

O modelo de regressão polinomial ajustado para explicar as oscilações de nível em função do EVI-2 no poço 9 apresentou um ótimo ajuste ($R^2 = 0,93$) demonstrando que existe uma relação entre os níveis freáticos observados e os índices de vegetação estabelecidos.

As análises estatísticas apresentadas indicam um caminho que pode ser seguido na mode-

lagem estatística de dados hidrogeológicos. Modelos de regressão múltipla, polinomial, espacial, entre muitos outros podem agregar diferentes fontes de dados de sensoriamento remoto, com mapeamentos geofísicos à campo, levantamentos a partir de amostras, ensaios em poços, entre outras fontes de dados. A extrapolação de informações fornecidas pelas séries temporais do sensor MODIS pode ser feita em áreas onde dados de monitoramento de nível freático estejam disponíveis e exista correlação entre a variação dos níveis do aquífero e valores de EVI-2, considerando-se o mesmo domínio hidrogeológico. O uso dessas informações geradas por séries temporais de índices de vegetação em modelos hidrogeológicos que considerem o uso e cobertura da terra pode ser uma alternativa de baixo custo para acessar a variação espaço temporal de níveis freáticos, em escala local e regional. Porém, destaca-se a necessidade de um maior conjunto de dados para melhor detalhamento destas relações, bem como buscar correlacionar outras variáveis que possam incidir neste processo de oscilação dos níveis freáticos.

É necessária uma maior quantidade de dados e estudos em outros locais e domínios aquíferos, a fim de conclusões mais detalhadas sobre

como as culturas interferem na dinâmica dos níveis freáticos e como índices de vegetação podem capturar essa dinâmica. O uso desse tipo de dados não descarta o monitoramento prévio de níveis em uma bacia, pois não permite calcular ou prever níveis, mas sim comportamentos em função da resposta da vegetação quando essa possui influência significativa na dinâmica das águas subterrâneas

CONCLUSÕES

A análise realizada mostrou que existem correlações entre as séries temporais de índices de vegetação EVI-2 gerados pelo sensor MODIS e os níveis freáticos observados na Bacia do Ribeirão da Onça, gerando bons resultados em culturas extensivas, de grande porte e ciclo sazonal como eucalipto e cana-de-açúcar.

A análise estatística demonstrou ser possível a partir de valores das séries de EVI-2 explicar relações entre a interação entre a vegetação e os níveis freáticos, os efeitos do manejo das culturas nessa dinâmica e de possíveis variações climatológicas em aquíferos livres e áreas de recarga direta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro a essa pesquisa (Processos 2009/05204-8 e 2011/11484-3) e pela bolsa de iniciação científica (Processo 2010/14914-6) concedida ao segundo autor. A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado concedida ao terceiro autor. A equipe do LHC-SHS pelo compartilhamento dos dados de monitoramento e auxílio em atividades de campo (Convênio 079/2010 Proc. 285/100/01/2008 UNESP-CEO/USP-EESC). Ressalta-se que as conclusões apresentadas pelos autores não são, necessariamente, as mesmas da FAPESP.

REFERÊNCIAS

- BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 35-43, 1999.
- BARRETO, C. E. A. G. **Balanco hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2005. 270 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo (USP), São Carlos, 2006.
- BOMFIM, E. P.; MOLINA, E. C. Análise da variação dos elementos do campo de gravidade na região do Aquífero Guarani a partir dos dados GRACE. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, p. 17-34, 2009.
- FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p. 57-68, 2011. doi: 10.6062/jcis.2011.02.01.0032. <http://www.epacis.net/jcis>
- 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, p. 3833-3845, 2008.
- HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 245p.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. RODRIGUEZ, E.

- P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.
- INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). **Monitoramento da floresta amazônica por satélite**, Projeto PRODES, 2008. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/r2007.htm>. Acesso em: 12 Mar 2013.
- JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E. F.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, B.; KNYAZIKHIN, Y. RUNNING, W. S.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L. MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNSELEY, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global changing research. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 36, p. 1228-1247, 1998.
- JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISSETTE, J. T. An overview of MODIS land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.
- KNOTTTERS, M.; VAN WALSUM, P. E. V. Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component. **Journal of Hydrology**, v.197, p.25-46, 1997.
- LANDIM, P. M. B. **Análise de dados geológicos**. São Paulo: EDUNESP, 1998.
- 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: A. Silva Vieira Editora, 2007. p. 23-35.
- LE MAITRE, D. C.; SCOTT, D. F.; COLVIN, C. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. **Water SA**, v. 25, p. 137-152, 1999.
- MANZIONE, R. L., WENDLAND, E.; TANIKAWA, D. H. Stochastic simulation of time-series models combined with geostatistics to predict water-table scenarios in a Guarani Aquifer System outcrop area, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 20, p. 1927-1937, 2012.
- MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 2008. p. 673-686.
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, p. 223-231, 2004.
- NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J. & WASSERMAN, W., eds. **Applied linear statistical models**. McGraw-Hill, Chicago, 1996. 1408p.
- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010. doi: 10.3390/rs2041057.
- RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; AGUIAR, D. A.; MOREIRA, M. A.; MELLO, M. P.; FABRINI, D.; AMARAL, D. F.; PIRES, B. M. The Soy Moratorium in the Amazon biome monitored by remote sensing. **Remote Sensing**, v. 3, p. 185-202, 2011. doi: 10.3390/rs3010185
- SCANLON, B. R.; REEDY, R. C.; STONESTROM, D. A.; PRUDIC, D. E.; DENNEHY, K. F. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1577-1593, 2005.
- SHIKLOMANOV, I. **World Water Resources**. A new appraisal and assessment for 21st century. Paris: International Hydrological Programme/UNESCO, 1998. 37p.
- SMITH, D. M., INMAN-BAMBER, N. G., THORBURN, P. J. Growth and function of the sugar cane root system. **Field Crops Research**, v. 92, p. 169-183, 2005.
- SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e descrição. 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: A. Silva Vieira Editora, 2007. p. 3-21.
- VAERET, L.; KELBE, B.; HALDORSEN, S.; TAYLOR, R. H. A modeling study of the effects of land management and climatic variations on groundwater inflow to Lake St Lucia, South Africa. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 1949-1967, 2009.
- VON ASMUTH, J.R., MAAS, K., BAKKER, M., PETERSEN, J. Modeling time series of ground water head fluctuation subjected to multiple stresses. **Ground water**, v. 46, p. 30-40, 2008.
- VÖRÖSMARTY, C.; LETTENMAIER, D.; LEVEQUE, C.; MEYBECK, M.; PAHL-WOSTL, C.; ALCAMO, J.; COSGROVE, W.; GRASSL, H.; HOFF, H.; KABAT, P.; LANSIGAN, F.; LAWFORDE, R.; NAIMAN, R. Humans transforming the global water system. **Eos**, v. 85, p. 509-520, 2004.
- WENDLAND, E., BARRETO, C. E. A. G., GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, p. 261-269, 2007.