Revista Brasileira de Cartografia
RBC | Rev. Bras. Cartografia

DOI: 10.14393/rbcv70n3-45986

Séries temporais do índice NDVI na avaliação do comportamento sazonal do Aquífero Rio Claro

NDVI Time Series to Evaluate the Seasonal behavior of Rio Claro Aquifer

Elias Hideo Teramoto[1]
Maria Teresa Benjumea[2]
Roger Dias Gonçalves[3]
Chang Hung Kiang[4]

Recebido em março de 2018.
Aprovado em setembro de 2018.

RESUMO
A partir de imagens do infravermelho próximo e da banda do vermelho do sensor OLI do satélite Landsat 8 com resolução espacial de 30 metros e resolução temporal de 16 dias, foram calculados os valores de NDVI do período compreendido entre abril de 2013 e agosto de 2017. A partir dos valores de NDVI calculados foi construída uma série histórica para análise das variações sazonais do NDVI e sua relação com as variações nos índices pluviométricos e com variação do nível d'água do Aquífero Rio Claro. Os pontos onde os valores de NDVI foram amostrados contemplam diferentes combinações de cobertura vegetal e diferentes contextos fisiográficos e de uso e ocupação do solo. Os resultados indicam que as culturas compostas por cana-de-açúcar não possibilitam uma avaliação adequada das variações da disponibilidade de água no solo em razão do controle por irrigação e ciclo de plantio, crescimento e colheita. O NDVI de vegetações esparsas em áreas urbanas é reduzido e apresenta baixas variações pois resulta da influência da mistura de respostas espectrais de outros alvos. Os valores de NDVI das matas ciliares se mantem elevados e apresentam variações temporais pouco expressivas em razão da disponibilidade hídrica nestas regiões e do fácil acesso das raízes à água subterrânea, que se encontram muito rasas nestas porções. As respostas mais representativas quanto às variações da disponibilidade hídrica do solo a partir do NDVI foram expressadas pela mata nativa/reflorestamento em porções

[1]Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), UNESP – Campus de Rio Claro/SP, Brasil. E-mail: teramoto@rc.unesp.br
[2]Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), UNESP – Campus de Rio Claro/SP, Brasil. E-mail: teresabenjumea@gmail.com
[3]Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), UNESP – Campus de Rio Claro/SP, Brasil. E-mail: roger.dias@unesp.br
[4]Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), UNESP – Campus de Rio Claro/SP, Brasil. E-mail: chang@rc.unesp.br

topográficas mais elevadas, onde a recarga do aquífero ocorre de maneira mais expressiva.

PALAVRAS-CHAVE: NDVI. Água subterrânea. Aquífero Rio Claro, Landsat 8.

ABSTRACT
Based on the near infrared and red band images from satellite Landsat 8 OLI, with spatial resolution of 30 meters and temporal resolution of 16 days, the NDVI values have been calculated for the period between April 2013 and August 2017. A time series of the calculated values of NDVI seasonal variation was constructed in order to evaluate its relation to rainfall patterns and the groundwater level fluctuations. The sampled points of NDVI values encompass different combinations of vegetation cover, physiographic contexts as well as land use and occupation. The results indicate that the sugarcane does not reflect a suitable parameter to evaluate the soil water availability, most due to crop control and planning, growth and harvesting cycles. The NDVI of the vegetation in urban areas presents low variations and reflects a mixture of other targets responses. The NDVI values of riparian forests are always high and present low variability along the time since the roots can easily access the shallow groundwater in these portions. The most representative response of NDVI change to understand the water availability in the soil was obtained by native forest/reforestation located in higher elevation and flat areas where the aquifer recharge occurs more significantly.

KEYWORDS: NDVI. Groundwater. Rio Claro aquifer. Landsat 8

* * *

Introdução

O foco das pesquisas empregando o sensoriamento remoto em hidrologia tem sido destinado ao desenvolvimento de abordagens para estimativas de variáveis como temperatura da superfície do solo, teor de umidade do solo, qualidade da água, cobertura vegetal, etc. Além destes parâmetros, o sensoriamento remoto tem sido empregado como ferramenta para medir a taxa de evapotranspiração e o escoamento superficial (SCHMUGGET al., 2002).

A disponibilidade de água no solo é o principal fator que controla a intensidade da atividade fotossintética de uma vegetação. Por esta razão, a taxa de intensidade fotossintética é um importante indicador da disponibilidade hídrica e é mensurada a partir da quantidade de clorofila na

biomassa de uma vegetação - por técnicas de sensoriamento remoto. A clorofila absorve a radiação vermelha visível emitida pelos sensores remotos e o mesofilo esponjoso reflete a radiação infravermelha próxima. Como resultado, regiões com maior capacidade fotossintética são caracterizadas nas imagens de satélite como regiões com baixa refletância em sinais com comprimento de onda da faixa do vermelho e elevada refletância em sinais do infravermelho (ROUSE et al., 1973; TUCKER, 1979; CHEN e BRUTSAERT, 1998). As variações nos valores de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) seguem padrões sazonais refletindo variações fenológicas dos diversos tipos de vegetação. O ciclo sazonal do NDVI, conhecido como estação de crescimento, é caracterizado por um período de elevação seguido por um período de queda. A estação de crescimento está relacionada a variações na atividade fotossintética da vegetação, que é um fator diretamente associado à disponibilidade de água no solo.

Diante da associação entre o NDVI e a quantidade de água presente no solo, diversos trabalhos demostraram a aplicação do NDVI para uma ampla gama de estudos hidrológicos e climáticos. Incontáveis trabalhos, incluindo Carlson et al. (1990), Farrar et al. (1994), Wang et al. (2004), Dubois et al. (1995) e Chen et al. (2014) demostraram a existência de uma relação linear entre NDVI e umidade do solo, possibilitando entender o movimento da água em subsuperfície. Além de possibilitar estimar o teor de umidade do solo, Price (1990), Nemani et al. (1989), Carlson et al. (2007), Johnson et al. (2012) demonstram a potencialidade do NDVI para a estimativa de evapotranspiração, permitindo estimativas acuradas do balanço hídrico. Outros trabalhos têm demonstrado o NDVI como indicador de períodos prolongados de estiagem e secas, tal como Peters et al. (2002), Gu et al. (2008), Karnielli et al. (2010). Alguns trabalhos tais com Zhou et al. (2013) associaram o NDVI com a profundidade do nível d'água.

Tendo em vista que as variações sazonais de NDVI representam a disponibilidade de água no solo, este parâmetro pode ser incorporado no monitoramento hidrológico, sobretudo para diagnósticos dos efeitos da

sazonalidade da precipitação. Para compreender o significado das variações sazonais do NDVI e suas possíveis aplicações na interpretação do monitoramento hidrológico, este trabalho pretendeu interpretar uma série histórica com as variações do NDVI, correlacionando estas variações com o regime hidrológico do Aquífero Rio Claro.

2 Materiais e Métodos

2.1. Localização da área de estudo

O município de Rio Claro está situado na porção centro-oeste do Estado de São Paulo e é limitado pelos municípios de Corumbataí e Analândia a norte, Piracicaba a sul, Araras e Santa Gertrudes a leste, Ipeúna e Itirapina a oeste. Rio Claro está localizado a 173 km da capital paulista, com ligação pelo sistema Anhanguera-Bandeirantes e rodovia Washington Luiz. A Figura 1 mostra a localização do munícipio de Rio Claro/SP e extensão do aquífero homônimo, objeto do presente estudo. O clima do munícipio de Rio Claro é do tipo Cwa (tropical com duas estações bem definidas), segundo a classificação de Köppen (NIMER, 1989).

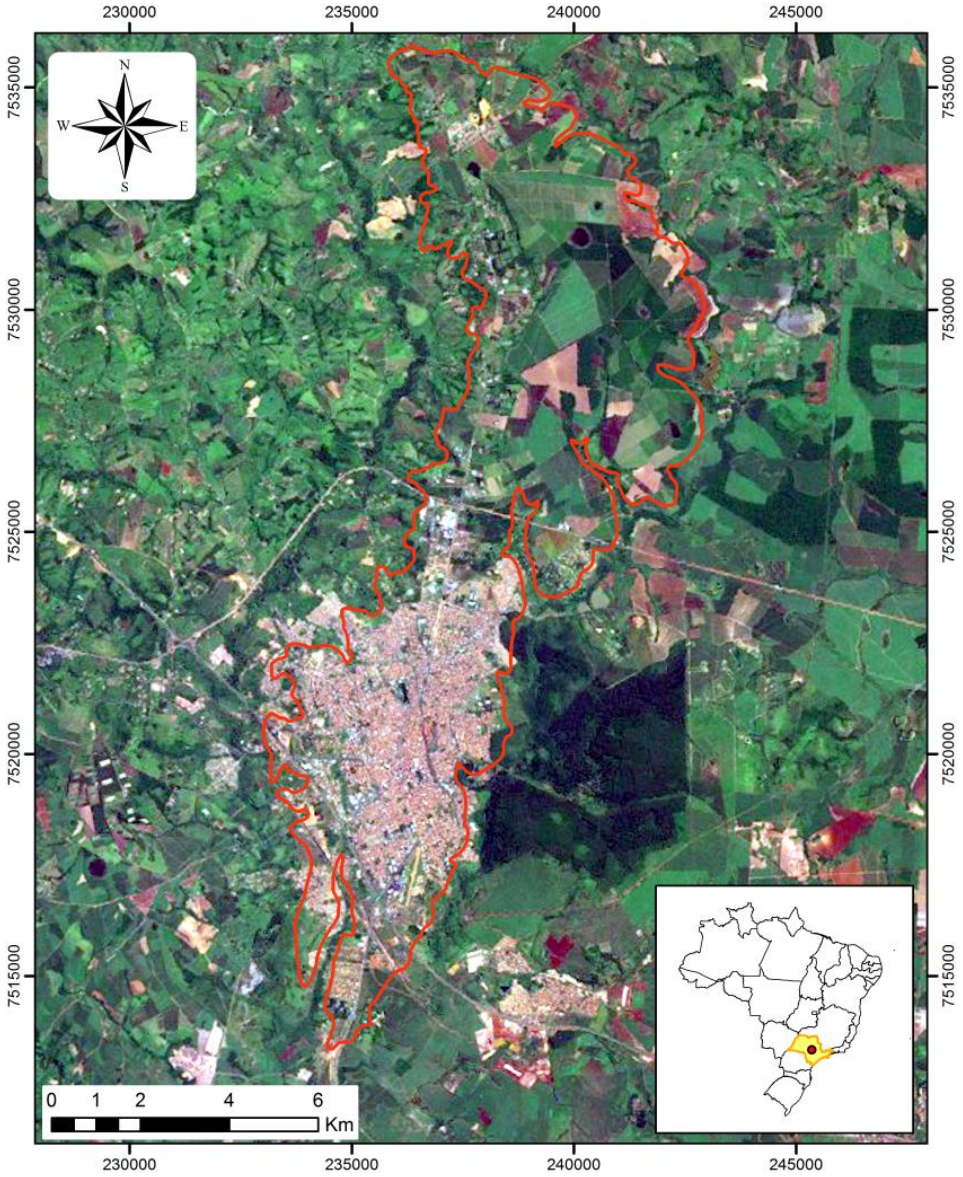
O Aquífero Rio Claro representa um aquífero do tipo livre e raso, composto por litotipos predominantemente arenosos da unidade geológica homônima, de idade Cenozóica (SOARES e LANDIM, 1976). Este aquífero abrange uma área de 84,46 km², espessuras máximas superiores a 30 metros e potencial de exploração para fins de abastecimento em virtude de suas características hidráulicas, como demonstrado por Oliva (2007) e Gonçalves (2016).

2.2. Série temporal da variação do NDVI

Lançado em fevereiro de 2013, o satélite Landsat-8 apresenta órbita praticamente polar, posicionando-se de maneira heliossíncrona a uma

altitude de aproximadamente 705 km. Existem dois sensores embarcados no satélite Landsat-8, o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). Os sensores a bordo do satélite Landsat-8 possuem faixa de imageamento de 170 km norte-sul por 185 km leste-oeste, resolução temporal de 16 dias, resolução espacial de 30 m para as bandas do visível, 15 m para banda pancromática e 100 m para as bandas termais (TIRS).

Figura 1 – Localização do município de Rio Claro e da extensão do Aquífero Rio Claro, onde se encontra a área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para monitorar as variações sazonais do NDVI, foram adquiridas as imagens Landsat 8 OLI no website da USGS (*United States Geological Survey*). Foram obtidas 33 imagens com os valores de NDVI sobre o aquífero Rio Claro ao longo do período compreendido entre abril de 2013 e agosto de 2017. Tendo em vista que as imagens do sensor OLI/Landsat 8 são distribuídas pela USGS com a correção prévia da refletância atmosférica, não é necessário fazer a correção desta interferência.

Baseando-se nas respostas espectrais da vegetação em relação à radiação da faixa do vermelho e infravermelho próximo, Rouse et al. (1973) propôs o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para o mapeamento da cobertura vegetal. Este índice representa um indicador numérico, que varia de -1 a 1. Enquanto o valor 0 representa a vegetação sem folha, sujeita à condição de estresse hídrico devido ao déficit hídrico do solo, o valor 1 representa a vegetação com folhas, sem restrições de água e na plenitude das funções metabólicas e fisiológicas (PEÑUELAS e FILELLA, 1998). Deste modo, para áreas cobertas por vegetação, os valores de NDVI irão variar de 0 a 1. No caso de corpos d'água superficiais (rios, lagos e represas) ou nuvens, o valor de NDVI será negativo.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é obtido pela razão entre a diferença da refletância do infravermelho próximo (NIR) e a refletância do vermelho (R), representadas respectivamente pelas bandas 4 e 5 do sensor OLI/Landsat 8 (ROUSE et al., 1973):

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

A vegetação possui um comportamento sazonal ao longo do ano, na qual um período de crescimento na atividade fotossintética é sucedido por decremento, como demonstrado por Reed et al. (1994). O incremento na atividade fotossintética se dá em resposta ao influxo de água nos períodos chuvosos, caracterizando-se por períodos de crescimento dos valores de

NDVI. Por outro lado, nos períodos de estiagem, existe a redução na atividade fotossintética que, por sua vez, se caracteriza pelo decréscimo nos valores de NDVI. O ciclo completo com o crescimento e posterior decremento dos valores de NDVI é conhecido por estação de crescimento e reflete as variações na disponibilidade de água no solo.

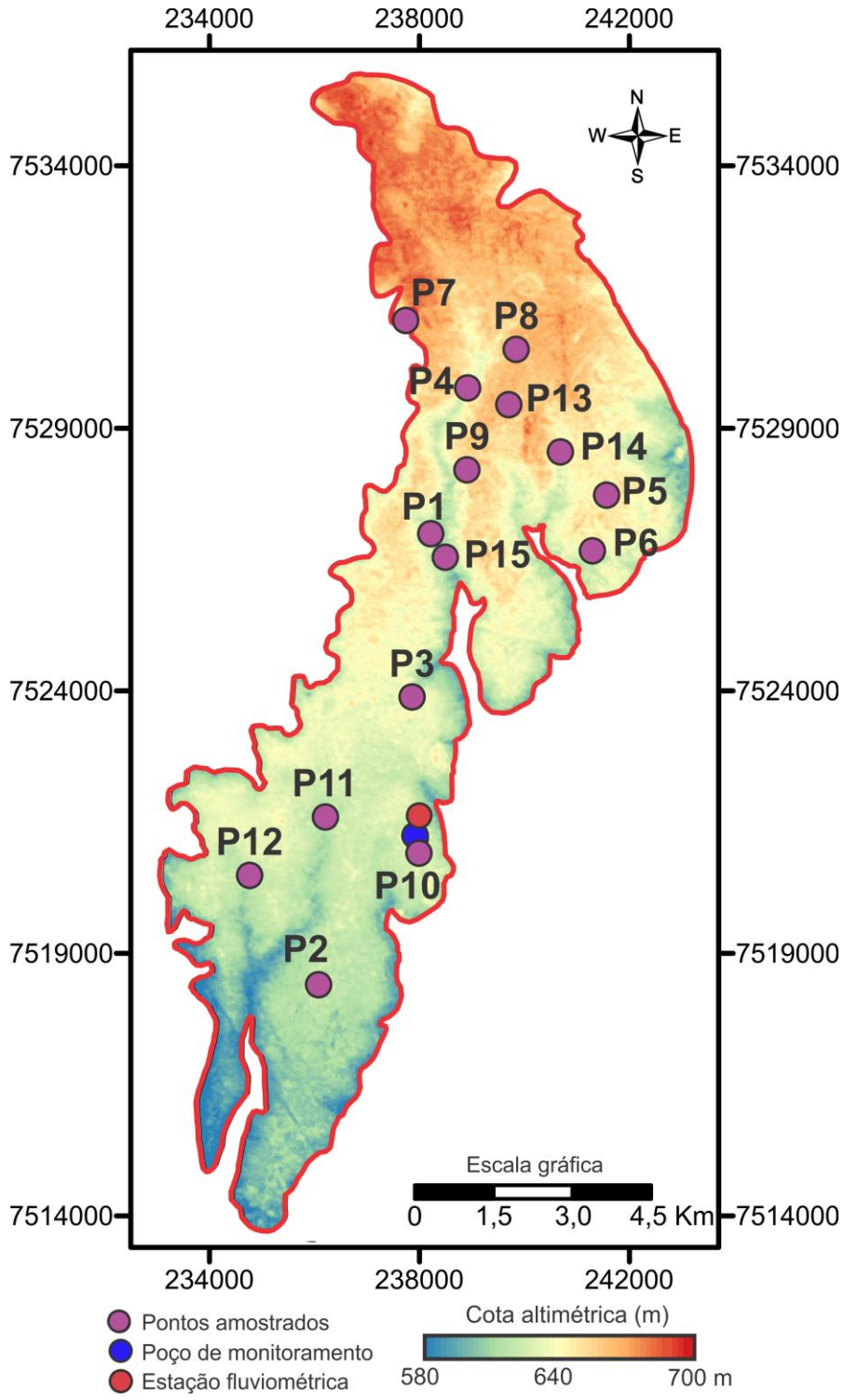
Cada tipo de vegetação possui uma estação de crescimento característica em razão de variações da profundidade da zona radicular e características fenológicas. Adotando estas características como critérios, a cobertura vegetal do aquífero Rio Claro foi agrupada em 3 classes distintas, representadas por cultura de cana-açúcar, cultura de laranja e mata nativa/reflorestamento. As extensas matas de reflorestamento são representadas por amplas áreas cobertas por 144 espécies de eucalipto introduzidas no início do séc. XX, se concentrando na Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade. A resposta espectral da plantação de eucaliptos é bastante similar ao observado na mata nativa e, por esta razão, foram agrupadas em um mesmo conjunto, denominadas de matas nativas/reflorestamento.

Em relação à vegetação nativa, Zaine (1996) descreve a inexistência de manchas de Cerrado em Rio Claro e a existência de mata ciliar remanescentes nas margens do Ribeirão Cabeça, Rio Passa Cinco e no alto curso do Ribeirão Claro, enquanto fragmentos de floresta estacional semidecídua são encontradas a nordeste do munícipio. Cardoso-Leite et al. (2004) caracterizaram a composição fitossociológica de um fragmento de mata ciliar no munícipio de Rio Claro, com 40 espécies de árvores, das quais 24,5% são pertencentes à espécie *Tapirira guianensis*, 9,6% *Gochnatia polymorpha* e 9,5% pertencem à espécie *Copaifera langsdorffii*. Outro trabalho, desenvolvido por Prata et al. (2011) estudando 0,44 hectares de uma mata ciliar na microbacia do Ribeirão Claro apresentou uma composição fitossociológica distinta. Estes autores identificaram 22 espécies em 1.697 indivíduos amostrados, na qual as espécies mais abundantes foram a *Myrcia laruotteana*, *Sebastiania brasiliensis*, *Croton urucurana* e

Sebastiania commersoniana representando, respectivamente, 34,3%, 21,9%, 15,2% e 13% dos indivíduos amostrados. Teixeira e Assis (2005), estudando a composição fitossociológica de uma mata paludosa na porção nordeste do munícipio de Rio Claro e parte do município de Araras, identificaram 49 espécies em uma área de 8 hectares a partir da análise de 1.651 indivíduos. As espécies mais abundantes descritas por Teixeira et al. (2005) foram *Euterpe edulis*, *Calophyllum brasiliense* e *Talauma ovata*, que representam respectivamente 41,2%, 23,6% e 7,6% dos indivíduos amostrados. Os resultados apresentados por Cardoso-Leite et al. (2004), Teixeira e Assis (2005) e Prata et al. (2011) evidenciam que a mata nativa, a despeito da baixa diversidade, congrega dezenas de espécies arbóreas com características fenológicas, profundidade de raiz e porte distintos. Contudo, na escala de trabalho adotada, a resposta espectral da vegetação nativa é bastante similar. Enclaves de porções arborizadas são encontrados na área urbana de Rio Claro com o plantio de espécies nativas ou exóticas. A maior extensão de mata no perímetro urbano de Rio Claro é representada pela mata ciliar ao longo do córrego da Servidão na porção sul da área urbana.

Para comparar a variação do NDVI de cada classe de vegetação com o volume de precipitação e a flutuação do nível d'água do aquífero, foram amostrados os valores de NDVI das imagens raster em pontos previamente determinados para construção de séries históricas deste parâmetro. A seleção dos pontos onde os valores de NDVI foram amostrados se baseou em trabalhos de mapeamento de campo conduzidos para identificar os diferentes contextos de uso e ocupação do solo na área de estudo. A partir do trabalho de campo, os pontos para amostragem de NDVI foram definidos adotando-se como critério a combinação do tipo de cobertura vegetal, diferentes porções fisiográficas (topo de morro e várzeas) e condições distintas de uso e ocupação do solo (áreas cultivadas, mata nativa/reflorestamento, área urbana). Com base em tais critérios, foram selecionados 40 pontos de amostragem, apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Localização da estação pluviométrica, poços de monitoramento e os pontos onde foram extraídos valores de NDVI para construção de séries históricas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3. Dados pluviométricos e monitoramento do nível d'água

Dados pluviométricos diários foram adquiridos junto à estação pluviométrica instalada e mantida pelo CEAPLA, UNESP – Campus de Rio Claro. Desde setembro de 2013, o nível d'água em poços de monitoramento instalados no campus da UNESP de Rio Claro é medido semanalmente com um medidor de nível.

Como demonstrado por Neto et al. (2016), o nível d'água em poços de monitoramento instalados no Campus da UNESP são continuamente monitorados desde o ano de 2002. Contudo, este monitoramento foi descontinuado em alguns períodos, havendo largos intervalos de tempo sem monitoramento. Desde o mês de setembro de 2013, o nível d'água nos poços situados no Campus da UNESP é monitorado com frequência semanal e um destes poços foi selecionado para comparação com os valores de NDVI. A localização da estação pluviométrica, cujos dados de precipitação foram registrados, e do poço de monitoramento, cuja medição do nível d'água é apresentada neste trabalho, está apresentada na Figura 2.

3 Resultados

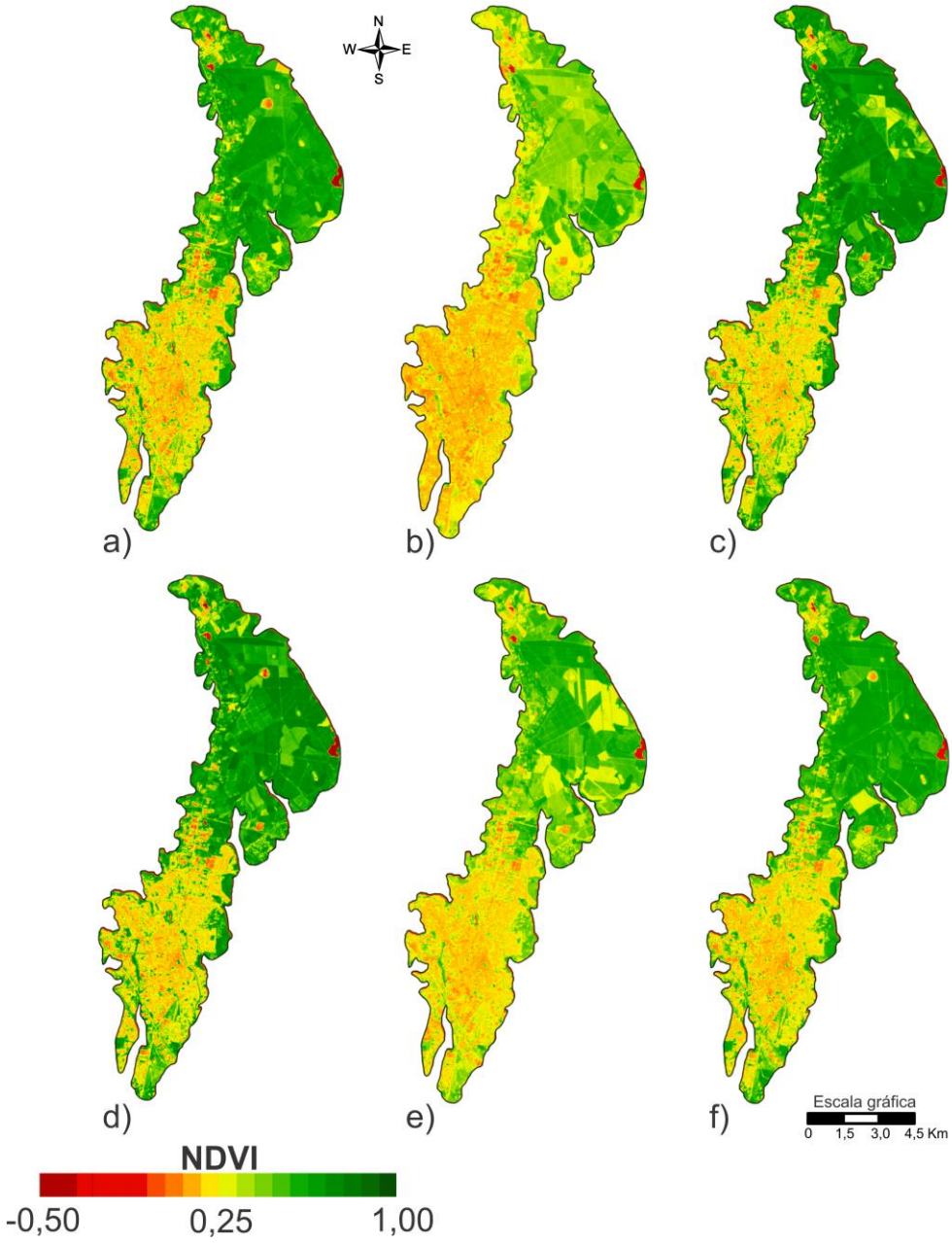
A Figura 3 apresenta as variações do NDVI no aquífero Rio Claro em 6 períodos distintos em ordem cronológica, onde é possível observar fortes variações nos valores de NDVI ao longo do tempo, particularmente na porção norte do aquífero. Os valores mínimos de NDVI foram registrados em agosto de 2014 (Figura 3b), enquanto os maiores valores foram registrados em janeiro de 2016 (Figura 3d).

3.1. Variações do NDVI

O NDVI e a flutuação do nível d'água são fenômenos sazonais e cíclicos ao longo do ano, onde um período de subida é sucedido por um

período de queda. Em ambos os casos, estas variações são controladas pela alternância de períodos chuvosos e períodos secos. O incremento no volume de precipitação induz ao incremento do volume que infiltra no solo até que a capacidade de campo seja atingida.

Figura 3 – Variações do NDVI do aquífero Rio Claro para diferentes períodos do monitoramento: a) 06/07/2013; b) 26/08/2014; c) 17/01/15; d) 20/01/2016; e) 16/09/2016; f) 30/05/2017.



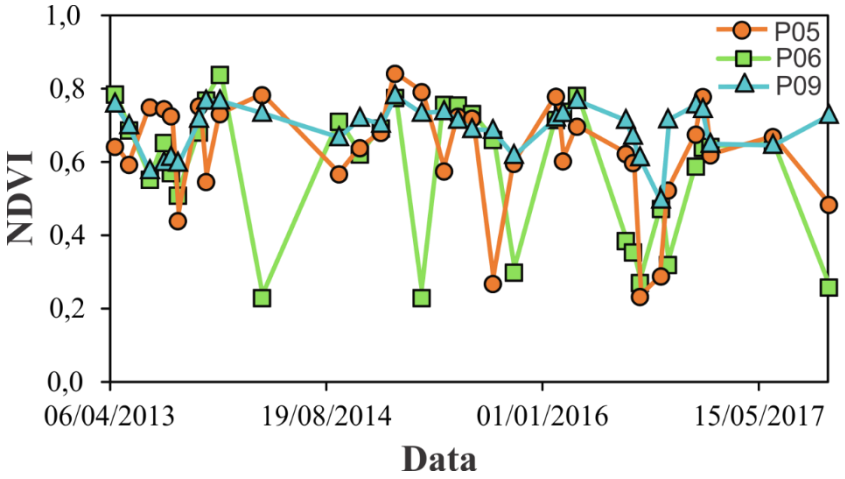
Fonte: Elaborado pelos autores.

O fluxo descendente de água no solo promove o umedecimento da zona radicular possibilitando assim o incremento na atividade fotossintética da vegetação, incrementando os valores de NDVI. A água que continua o fluxo descendente na zona não-saturada irá alcançar a zona saturada e recarregar o aquífero, fazendo com que o nível d'água do aquífero suba. Em razão deste comportamento, é esperado que a diferença no tempo no início da subida dos valores de NDVI e do nível d'água representa aproximadamente o tempo de trânsito da água da zona radicular até a porção superior da zona saturada.

3.1.1. Culturas de laranja e cana-de-açúcar

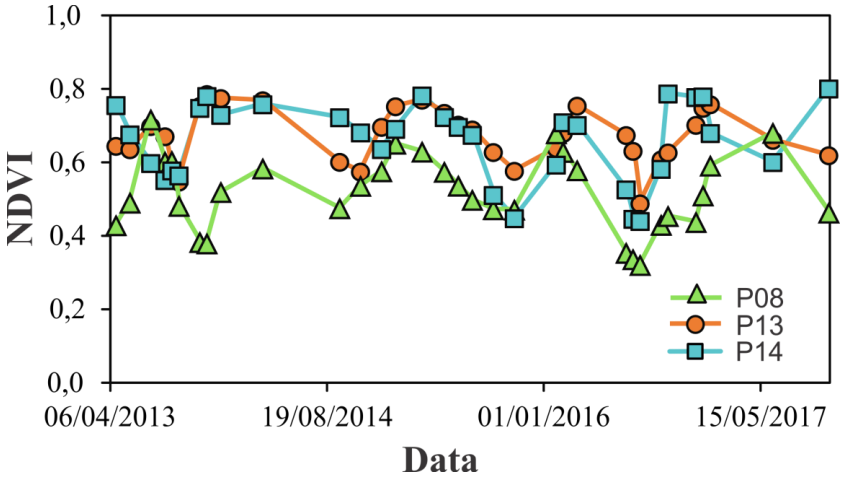
As plantações de laranja e cana-de-açúcar, que abrangem grande parte da porção norte do Aquífero Rio Claro, representam coberturas vegetais cujas variações no NDVI são essencialmente controladas pela ação antrópica. Estas plantações recebem irrigação para compensar o déficit de água no solo em períodos de estiagem e, deste modo, as variações sazonais da atividade fotossintética em razão da variação da pluviometria são atenuadas. Além disso, a cana-de-açúcar é caracterizada por fases de plantio, crescimento e colheita ao longo do ano, fazendo com que as variações de NDVI nas regiões cobertas por este tipo de vegetação (Figura 4) não reflitam somente a intensidade da atividade fotossintética, mas, sobretudo, a área coberta por esta cultura. Embora as variações do NDVI de áreas ocupadas por cultura da laranja (Figura 5) possua uma resposta similar à mata nativa/reflorestamento, as variações menores de NDVI são menos pronunciadas que aquelas, em razão da irrigação reduzir o estresse hídrico do solo.

Figura 4 – Variações do NDVI em três pontos de amostragem cobertas por culturas de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Variações do NDVI em três pontos de amostragem cobertas por culturas de laranja.



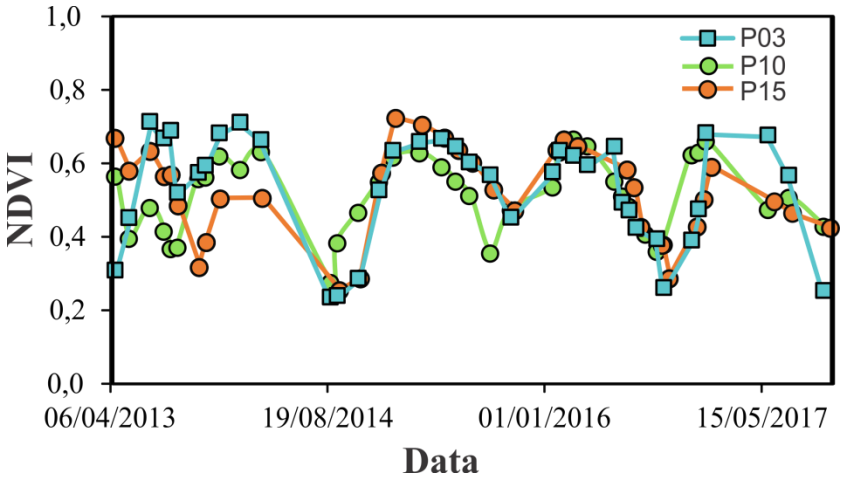
Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1.2. Mata nativa e de reflorestamento

As variações do NDVI das matas nativas/reflorestamento (Figura 6) oferecem um diagnóstico mais representativo do movimento da água no solo, uma vez que este tipo de vegetação representa coberturas estáveis, permanentes e com raízes profundas. Entretanto, a posição fisiográfica é um fator relevante na interpretação das variações do NDVI.

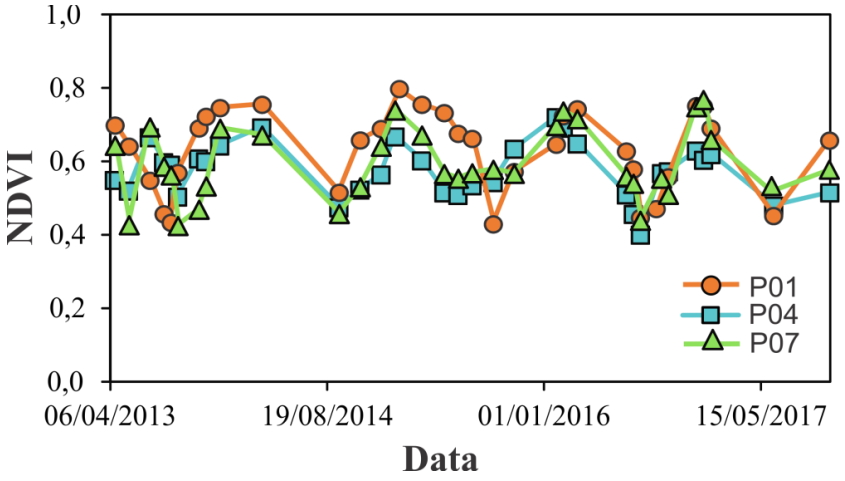
As variações nos índices NDVI das matas ciliares em áreas não urbanizadas (Figura 7) que ocupam as regiões de várzea se caracterizam por valores elevados de NDVI, acima de 0,5 e variações pouco expressivas deste índice quando comparadas com as matas nativas/reflorestamento que ocupam porções topograficamente mais elevadas. Ao contrário de áreas rurais, valores de NDVI de mata ciliar em áreas urbanas (Figura 8) apresentam-se abaixo de 0,5 e possuem baixa variação.

Figura 6 – Variações do NDVI em três pontos de amostragem cobertas por mata nativas / reflorestamento em porções topograficamente elevadas e planas.



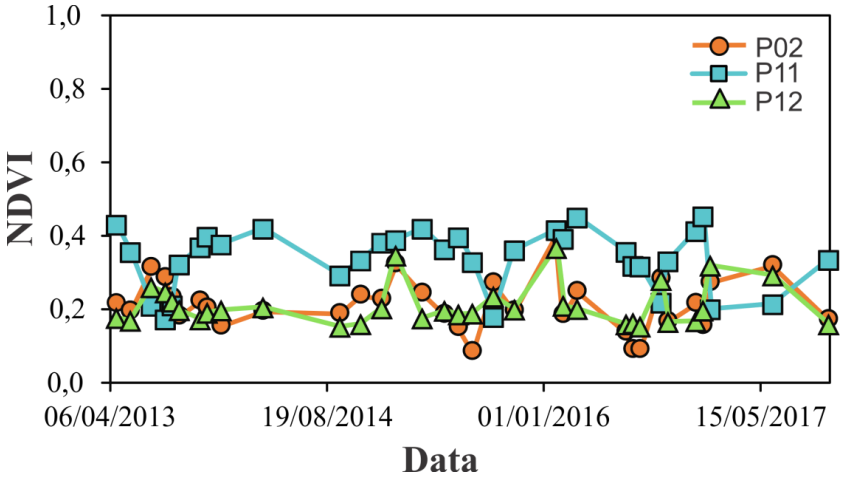
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Variações do NDVI em três pontos de amostragem cobertas por mata ciliar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 – Variações do NDVI em três pontos de amostragem cobertas por porções arborizadas de áreas urbanas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

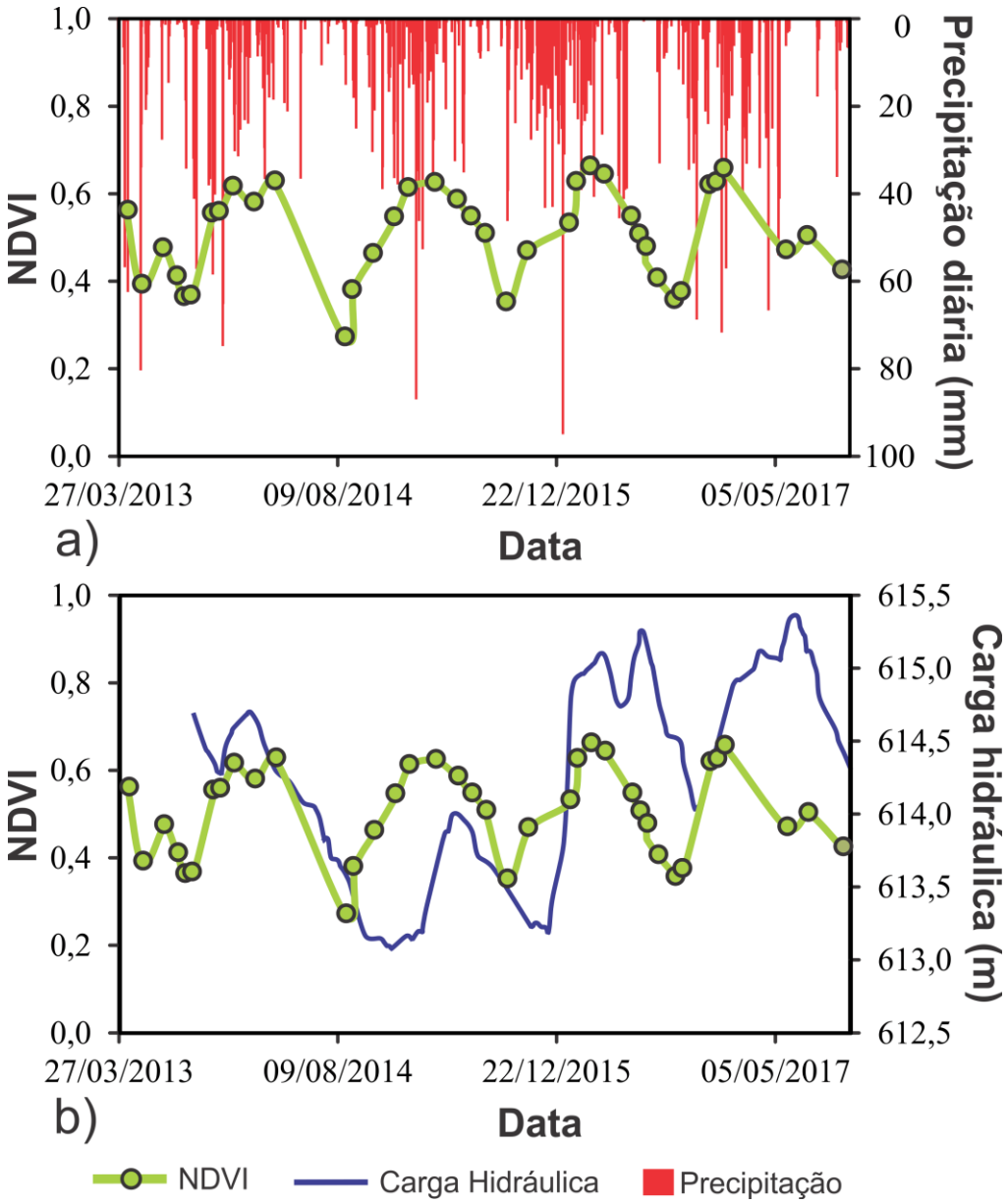
3.2. Relação do NDVI com a pluviometria e a variação do nível d'água

Para a série temporal de 1995 a 2014 registrou-se uma precipitação acumulada anual média de 1490,8 mm, sendo 2011 o ano mais chuvoso, com 1896,7 mm e 2014 o menos chuvoso, com 888,8 mm. Aproximadamente 80% da precipitação acumulada anual estão concentradas entre os meses de outubro e março (Figura 9a). A variação do nível d'água registrada nos poços de monitoramento instalados no Aquífero Rio Claro (Figura 9b) indica que a ascensão do nível d´água se inicia na segunda metade do mês de dezembro e atinge o seu ápice no mês de abril, quando um período de queda se inicia em razão da redução do volume de precipitação registrada a partir do mês de março.

Como demonstrado por Gonçalves (2016), os eventos de subida e descida do nível d'água ocorrem de maneira aproximadamente concomitante em todos os poços monitorados. Por esta razão, optou-se pela análise de um poço de monitoramento instalado e monitorado semanalmente desde setembro de 2013. Os valores de NDVI (P15) foram obtidos do ponto onde este poço de monitoramento está instalado e a cobertura vegetal é

representada majoritariamente por eucaliptos. A Figura 9a apresenta a comparação das variações de NDVI com as variações da precipitação acumulada diária, enquanto a Figura 9b apresenta a comparação das variações dos valores de NDVI com as flutuações de carga hidráulica observadas no poço de monitoramento.

Figura 9 – a) Comparação da variação do NDVI no ponto P15 e precipitação acumulada diária; b) Comparação entre a variação do NDVI e a variação da carga hidráulica.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A precipitação, a variação dos valores de NDVI e carga hidráulica do aquífero são eventos sazonais e correlatos, com uma defasagem de tempo entre si. A fim de estabelecer o tempo de defasagem entre os índices de precipitação e os valores de NDVI e carga hidráulica, foram realizados testes de correlação cruzada destas três séries históricas. Como as variações de carga hidráulica e do NDVI possuem periodicidade de amostragem variável, foi realizada uma interpolação linear dos dados existentes para elaboração de séries temporais diárias. A partir destas séries históricas foi realizada uma correlação cruzada para obtenção do tempo de defasagem entre a precipitação e NDVI, assim como entre NDVI e a variação da carga hidráulica. A maior correlação positiva entre a precipitação acumulada diária com os valores de NDVI foi de 0,1511 para um tempo de defasagem de 39 dias, enquanto a maior correlação positiva entre o NDVI e a carga hidráulica foi de 0,285 para um tempo de defasagem de 47 dias. Interpreta-se o tempo de defasagem entre a precipitação e o NDVI como o tempo necessário para que a chuva infiltre no solo, atinja a zona radicular e incremente a taxa de atividade fotossintética da vegetação. Empregando raciocínio similar, é possível interpretar o atraso entre o início da subida do NDVI e o início da subida da carga hidráulica como o tempo necessário para que a água na rizosfera flua verticalmente para a porção superior da zona saturada.

4 Discussões

Com o intuito de realizar uma análise preliminar da potencialidade do emprego do índice NDVI para o monitoramento do comportamento de aquíferos rasos e não confinados, como o Aquífero Rio Claro, este estudo comparou as variações sazonais do NVDI com o regime pluviométrico e as variações do nível d'água do aquífero. A maior parte dos trabalhos recentes abordando o uso do índice NDVI empregam as imagens do satélite MODIS. Este satélite oferece como vantagem a sua resolução temporal diária.

Contudo, a sua resolução espacial é de 250 x 250 m, e diante das dimensões do aquífero e da distribuição heterogênea do uso e ocupação do solo que recobre a área de estudo, as respostas espectrais refletem uma combinação de diversos tipos de alvos. Por esta razão, optou-se pelas imagens do satélite Landsat 8 que possui uma resolução espacial compatível com as dimensões dos alvos estudados.

A estação de crescimento possui fortes similaridades com a flutuação do nível d'água pois são eventos cíclicos anuais e controlados pela alternância de períodos chuvosos e períodos de estiagem. A subida do nível d'água e do NDVI estão associadas ao incremento de água que infiltra no solo após um período de pluviosidade intensa entre os meses de novembro e março. O tempo de defasagem de 47 dias entre o início da estação de crescimento e a ascensão do nível d'água pode ser aproximado como o tempo de transito de água da zona radicular para a porção superior da zona saturada. Entretanto, existe um tempo de defasagem entre a chegada da água na zona radicular e o incremento na atividade fotossintética e este tempo de defasagem deve ser determinado.

Outro fator a ser considerado para o emprego do NDVI para monitorar o movimento da água no solo é a determinação da profundidade das raízes dos diversos biomas que recobrem o Aquífero Rio Claro. Canadell et al. (1996) avaliando os dados de profundidade máxima de raízes de 290 espécies reportados na literatura, verificou profundidade máxima média de 7,0 ± 1,2 m em árvores, 5,1 ± 0,8 m para arbustos e 2,6 ± 0,1 m para plantas herbáceas. Todavia, a escassez destas informações representa uma fonte de incertezas para o monitoramento do perfil de umidade do solo. A determinação de valores médios da profundidade das raízes em cada bioma e a estimativa da defasagem de tempo entre a chegada da água na rizosfera e o aumento nos valores de NDVI permitirá empregar o índice NDVI para monitorar o movimento da água no solo.

As plantações de cana-de-açúcar que recobrem porção significativa do Aquífero Rio Claro não são bons indicadores da variabilidade natural da

umidade do solo em decorrência da alternância de períodos chuvosos e secos. As variações de NDVI neste tipo de cultura são decorrentes das fases de plantio, crescimento e colheita. Neste caso, o crescimento do NDVI está associado ao crescimento da cana-de-açúcar com consequente aumento de biomassa e área coberta com a colheita ocorrendo no auge da maturação da cultura. Embora pese a influência da irrigação, a cultura de laranja pode ser empregada para fins de monitoramento da umidade do solo, tendo em vista que a laranja é uma planta com tronco lenhoso e suas características fenológicas geram uma resposta espectral próxima da mata nativa/reflorestamento.

A análise comparativa da amplitude de variação do NDVI dentro da estação de crescimento permite uma análise da ciclicidade e da disponibilidade de água no solo. A avaliação das variações do NDVI para interpretação dos ciclos hidrológicos sazonais deve considerar o tipo de cobertura vegetal, posição fisiográfica do terreno e uso e ocupação do solo, uma vez que o comportamento da água e, consequentemente, as variações do NDVI, são fortemente dependentes destes fatores.

A classe de vegetação que melhor permitiu avaliações hidrológicas sazonais foram vegetações com raízes profundas, representadas por matas de árvores nativas ou de reflorestamento (eucalipto). As porções topograficamente mais elevadas e planas representam as zonas de recarga do aquífero, onde as variações do nível d'água e do NDVI (Figura 6) são mais expressivas. Nas áreas representadas por várzeas, os valores de NDVI são caracterizados por apresentarem valores elevados (acima de 0,5) e com variações pouco expressivas ao longo do tempo (Figura 7). As matas ciliares estão próximas das áreas de descarga do aquífero, onde o nível d'água encontra-se próximo da superfície e varia pouco ao longo do ano, fazendo com que as raízes das árvores freatróficas possuam fácil acesso à água, não passando por períodos de estresse prolongados. No caso de matas ciliares em áreas urbanizadas (Figura 8), os reduzidos valores de NDVI foram interpretados como a sobreposição da resposta espectral de outros alvos

além da vegetação estudada, em razão da resolução espacial de 30 m das imagens Landsat.

Diante das constatações levantadas no presente trabalho, de caráter preliminar, é possível verificar que o NDVI pode ser empregado para um diagnóstico dos ciclos hidrológicos sazonais onde os dados de monitoramento hidrológico são escassos ou inexistentes. Etapas posteriores de investigação permitirão correlacionar com a umidade do solo na zona radicular e, assim, quantificar a quantidade de água no solo em resposta aos eventos de precipitação e, deste modo, estimar quantitativamente a umidade do solo para fins de balanço hídrico e modelos numéricos de fluxo na zona não-saturada.

5 Conclusões

O NDVI pode representar uma importante ferramenta para fins de monitoramento hidrológico, uma vez que reflete a disponibilidade de água no solo. As variações sazonais do NDVI são decorrentes do tipo de vegetação no solo, da porção fisiográfica que ocupam e das condições de uso e ocupação do solo. No caso do Aquífero Rio Claro, as variações mais representativas foram obtidas em porções topograficamente mais elevadas, que representam as zonas de recarga do aquífero em áreas cobertas por mata nativas ou de reflorestamento. A comparação das séries históricas das variações de NDVI e variação do nível d'água do aquífero indicam que o tempo de defasagem entre estes dois parâmetros é de 47 dias e pode representar o tempo necessário para a água fluir da zona radicular até a porção superior da zona saturada. As investigações a serem conduzidas posteriormente devem incluir a correlação entre o teor de umidade do solo e os valores de NDVI para assim quantificar o volume de água no solo.

Referências

BOUNOUA, L.; COLLATZ, G. J.; LOS, S. O.; SELLERS, P. J.; DAZLICH, D. A.; TUCKER, C. J.; RANDALL, D. A. Sensitivity of climate to changes in NDVI. **Journal of Climate**, v. 13, n. 13, 2000. pp. 2277-2292

CANADELL, J.; JACKSON, R. B.; EHLERINGER, J. B.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E. D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, v. 108, n. 4, 1996. pp. 583-595

CARDOSO-LEITE, E.; COVRE, T. B.; OMETTO, R. G.; CAVALCANTI, D. C.; PAGANI, M. I. Fitossociologia e caracterização sucessional de um fragmento de mata ciliar, em Rio Claro/SP, como subsídio à recuperação da área. **Revista do Instituto Florestal**, v. 16, n. 1, 2004. pp. 31-41

CARLSON, T. N.; PERRY, E. M.; SCHMUGGE, T. J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 52, n. 1-2, 1990. pp. 45-69

CARLSON, T. An overview of the" triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. **Sensors**, v. 7, n. 8, 2007. pp. 1612-1629

CHEN, D.; BRUTSAERT, W. Satellite-sensed distribution and spatial patterns of vegetation parameters over a tallgrass prairie. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 55, n. 7, 1998. pp. 1225-1238

CHEN, T.; DE JEU, R.; LIU, Y. Y.; VAN DER WERF, G. R.; DOLMAN, A. J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, 2014. pp. 330-338

DUBOIS, P. C.; VAN ZYL, J.; ENGMAN, T. Measuring soil moisture with imaging radars. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, 1995. pp. 915-926

FARRAR, T. J.; NICHOLSON, S. E.; LARE, A. R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, n. 2, 1994. pp. 121-133

GONÇALVES, R. D. **Modelagem Numérica e Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Rio Claro.** Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro. 2016. 107p.

GU, Y.; HUNT, E.; WARDLOW, B.; BASARA, J. B.; BROWN, J. F.; VERDIN, J. P. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 22, 2008.

JOHNSON, L. F.; TROUT, T. J. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. **Remote Sensing**, v. 4, n. 2, 2012. pp. 439-455

KARNIELI, A.; AGAM, N.; PINKER, R. T.; ANDERSON, M.; IMHOFF, M. L.; GUTMAN, G. G.; GOLDBERG, A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. **Journal of climate**, v. 23, n. 3, 2010. pp. 618-633

NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, n. 4, 1989. pp. 276-284

NETO, D. C.; CHANG, H.K.; VAN GENUCHTEN, M.Th. A mathematical view of water table fluctuations in a shallow aquifer in Brazil. **Groundwater**, v. 54, n. 1, 2016. pp. 82-91

NICHOLSON, S. E.; FARRAR, T. J. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, n. 2, 1994. pp. 107-120

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. 1989.

OLIVA, A. **Estudo hidrofaciológico do aqüífero Rio Claro no município de Rio Claro – SP**; Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro. 2006. 196p.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends in plant science**, v. 3, n. 4, 1998. pp. 151-156

PETERS, A. J.; WALTER-SHEA, E. A.; JI, L.; VINA, A.; HAYES, M.; SVOBODA, M. D. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 68, n. 1, 2002. pp. 71-75

PRATA, E.M.B.; PINTO, S.A.F.; ASSIS, M.A. Fitossociologia e distribuição de espécies arbóreas em uma floresta ribeirinha secundária no mnicípio de Rio Claro, SP, Brasil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 34, n. 2, 2011. pp. 159-168

PRICE, J. C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 5, 1990. pp. 940-948

REED, B. C. et al. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of vegetation science**, v. 5, n. 5, 1994. pp. 703-71

ROUSE JR, J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 1974.

SCHMUGGE, T. J.; KUSTAS, W. P.; RITCHIE, J. C.; JACKSON, T. J.; RANGO, A. Remote sensing in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 25, n. 8-12, 2002. pp. 1367-1385

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. Depósitos cenozóicos na região centro sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 31, 1976. pp. 17-39

TEIXEIRA, A. P.; ASSIS, M.A. Floristic and phytosociological characterization of the arboreal and shruby stratum of a swamp forest in Rio Claro (SP), Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 28, n. 3, 2005. pp. 467-476

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, 1979. pp. 127-150

WANG, C.; QI, J.; MORAN, S.; MARSETT, R. Soil moisture estimation in a semiarid rangeland using ERS-2 and TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 2, 2004. pp. 178-189

ZAINE, M. F. **Patrimônios naturais e história geológica da região de Rio Claro/SP**. Rio Claro: Câmara Municipal de Rio Claro: Arquivo Público e Histórico do Município de Rio Claro, 1996. 91p.