

Monitoramento em alta frequência do índice de vegetação de sistema integrado Lavoura-Pecuária

High frequency monitoring of vegetation index in an integrated crop-livestock system

Marcos Corrêa Neves¹, Alfredo José Barreto Luiz², Naylor Bastiani Perez³

¹ Pesquisador, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP), Brasil, marcos.neves@embrapa.br

² Pesquisador, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP), Brasil, alfredo.luiz@embrapa.br

³ Pesquisador, Embrapa Pecuária Sul, Bagé (RS), Brasil, naylor.perez@embrapa.br

RESUMO

A presença frequente de nuvens restringe o monitoramento sistemático com dados orbitais dos sistemas agrícolas. A missão Sentinel-2, com seus dois satélites, combina alta resolução espacial (10 m) com uma taxa de revisita de 5 dias, chegando a 2 ou 3 dias em latitudes médias. Uma resolução temporal pequena é importante para aumentar a oferta de dados e minorar o problema da ocorrência de nuvens. Este trabalho apresenta o processo de seleção e processamento dos dados orbitais do Sentinel-2 e os resultados do monitoramento de um sistema Integração Lavoura-Pecuária por dois ciclos completos. Foram selecionadas 72 passagens e gerados mapas NDVI para cada passagem. A média dos índices de cada passagem foi utilizada como medida do vigor da vegetação em diferentes estágios do sistema, e o seu o desvio-padrão, como indicativo da variabilidade espacial. Os resultados demonstram que as constelações de satélites têm grande potencialidade para o acompanhamento dos sistemas agrícolas em alta frequência.

Palavras-chave: índice de vegetação; integração lavoura-pecuária; Sentinel-2.

ABSTRACT


The frequent presence of clouds restricts the systematic monitoring of agricultural systems with orbital data. The Sentinel-2 mission with its two satellites combines a high spatial resolution (10m) with a 5-day or 2/3-day revisit rate in mid-latitudes regions. A small temporal resolution is important to increase the data supply and reduce the problem of cloud occurrence. This paper presents the process of selection and processing of Sentinel-2 orbital data and the results of monitoring a Crop-Livestock Integration system for two complete cycles. Seventy-two cloudless images were selected and corresponding NDVI maps were generated. The indices average of each passage was used as measure of the vigor of the vegetation in different system stages and standard deviation as an indication of the spatial variability. The results demonstrate that systems with multiple satellites have great agricultural monitoring potential at high frequency.

Keywords: vegetation index; integrated crop-livestock; Sentinel-2.

1 INTRODUÇÃO

Os dados orbitais têm grande aplicabilidade na agricultura, sendo os índices de vegetação, em especial, muito úteis para caracterizar a dinâmica e o vigor da vegetação agrícola (Formaggio; Sanches, 2017). No entanto, existem limitações ao emprego em monitoramento sistemático de cultivos agrícolas, sendo uma das maiores dificuldades a disponibilidades de imagens livres de nuvens em todo o ciclo do desenvolvimento das culturas (Eberhardt et al., 2016). As constelações formadas por um conjunto de satélites portando sensores idênticos permitem melhorar a resolução temporal dos dados orbitais, aumentando as chances de disponibilidade de dados em diversos momentos do ciclo da cultura.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000049>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

A missão Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia (ESA), é uma constelação mínima, formada por dois satélites em mesma órbita, polar e síncrona ao Sol, e defasados de 180° entre si. O sistema utiliza o sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) com 13 bandas espectrais, com resolução espacial de 10 m para as bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, 20 m ou 60 m para as demais. Os dois satélites oferecem juntos uma resolução temporal de 5 dias em latitudes próximas ao Equador, chegando a 2 ou 3 dias em latitudes médias (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

A área de estudo está localizada no município de Bagé (RS) e se encontra entre duas órbitas do Sentinel-2, em uma zona de sobreposição, resultando no dobro da resolução temporal padrão da missão, o que permite uma taxa de revisita de 12 imagens/mês. Embora existam constelações com resolução temporal diária, o Sentinel-2, além de suas características técnicas, oferece acesso livre às suas imagens.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foi proposto originalmente por Rouse et al. (1973) e é amplamente utilizado para avaliação e monitoramento dos sistemas agrícolas. Há muitos trabalhos utilizando NDVI a partir de diferentes sensores como o Modis e AVHRR/NOAA (Gurgel et al., 2003; Esquerdo et al., 2009; Trindade et al., 2019), mas o Sentinel-2 permite ampliar as aplicações na agricultura para situações que exigem uma melhor resolução espacial combinada a uma boa resolução temporal.

O objetivo deste trabalho é mostrar a aplicabilidade do uso dos dados Sentinel-2 em monitoramento de alta frequência, considerando as dificuldades de processar um grande volume de dados orbitais, e em que medida estes dados são úteis para o manejo do sistema.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo tem cerca de 13 ha e está localizada na fazenda experimental da Embrapa Pecuária Sul, em Bagé (RS). Todos os passos do processo são ilustrados na Figura 1. A primeira etapa é a seleção de imagens sem nuvens. As imagens do Sentinel-2 foram selecionadas e baixadas no site *EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) da USGS (*United States Geological Survey*). O conjunto de imagem cobriu um pouco mais de 24 meses do sistema ILP. Foram selecionadas 72 imagens sem interferências de nuvens de um total de 288 passagens do satélite, considerando as duas órbitas.

As imagens do repositório correspondem ao produto “L1C” da missão Sentinel-2, são imagens com a medida da reflectância no topo da atmosfera (*TOA – top-of-atmosphere*), ortorretificadas e registradas espacialmente para a projeção UTM, *datum* WGS84, em quadrículas de 100 km. A dimensão dos dados correspondentes a uma quadrícula é de aproximadamente 700 MB. O produto “L2A” adiciona a correção atmosférica, expressando a reflectância na superfície terres-

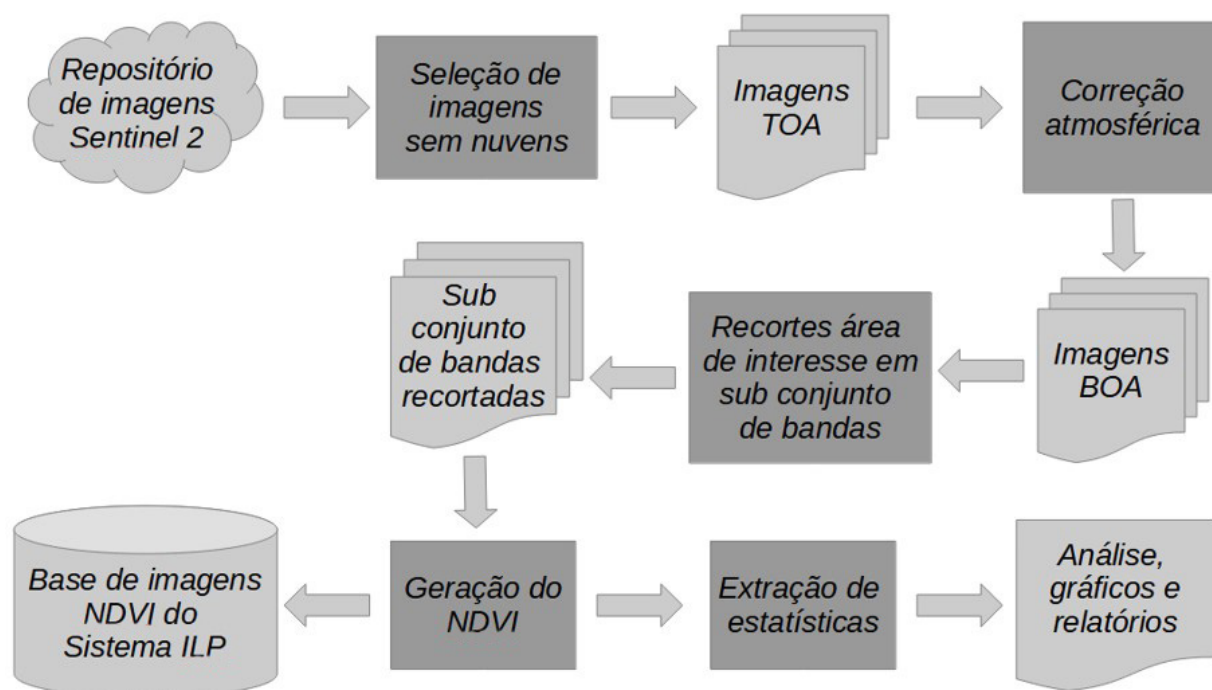


Figura 1. Esquema do processamento do conjunto de imagens.

tre, abaixo da atmosfera (*BOA – bottom-of-atmosphere*). Este produto é oferecido por demanda, mas pode também ser produzido pelo usuário utilizando o programa *sen2cor.py*, disponibilizado pela ESA. No nosso caso, foi desenvolvido um pequeno *script* na linguagem Python que executa esta correção para todas as imagens selecionadas (passagens) dispostas dentro de uma mesma pasta em um computador, como forma de automatizar esta etapa, já que o processamento de dezenas de imagens pode levar horas de processamento. A versão utilizada do *sen2cor.py* foi a V2.5.5 (ESA, 2018).

O conjunto de dados correspondendo a 72 passagens ocupa cerca de 36 GB. Na terceira etapa são selecionadas as bandas que serão efetivamente utilizadas e recortadas pelo polígono com os limites da área de interesse. Após esta etapa, boa parte de espaço em disco pode ser liberada. A quarta etapa é a geração das imagens NDVI para todas as passagens por operação entre bandas. Uma última etapa extrai estatísticas do conjunto de imagens NDVI (média e desvio-padrão) para as análises e geração de gráficos. Para a extração das estatísticas, foi utilizado um limite da área ligeiramente menor (buffer de 10 m) para retirar o efeito de borda. Para as etapas 3, 4 e 5 do diagrama da Figura 1, foram criados *scripts* em Python dentro do QGIS 3.22 para processamento em lote, de forma a tornar o processo mais eficiente. Isto foi necessário porque a análise foi feita em retrospectiva, e todos os dados foram tratados posteriormente. Se esse processo for executado durante o desenvolvimento das culturas, efetivamente como um monitoramen-

to, cada passagem será executada isoladamente, no prazo de uma a duas horas, dependendo da capacidade de processamento, para produzir os resultados correspondentes.

Algumas das etapas do processo foram otimizadas, integral ou parcialmente, como forma de tornar o processo mais eficiente. Foram analisados pouco mais de 24 meses de dados, abrangendo dois ciclos completos de um sistema Integração Lavoura-Pecuária (ILP), com soja no verão e azevém no inverno. Na avaliação do sistema ILP, foi utilizado o NDVI médio da área como medida quantitativa do seu desenvolvimento ao longo do tempo, e o desvio-padrão em cada passagem como medida da variabilidade espacial deste desenvolvimento. São apresentados e discutidos os perfis de variação do NDVI e mapas ao longo dos dois ciclos do sistema ILP.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando as 72 imagens aproveitáveis (livre de nuvens), a taxa de aproveitamento média das imagens do Sentinel-2 ficou em torno de 25%. Em média, teríamos três imagens boas por mês, o que é razoável com os objetivos do trabalho. Porém, esta distribuição não é regular. Isto demonstra que taxas de revisita maiores seriam mais indicadas para o monitoramento em alta frequência, de forma a não faltar dados em momentos decisivos do monitoramento.

A Figura 2 apresenta a evolução do NDVI_m (média dos valores dos pixels da imagem NDVI da área) ao longo dos dois ciclos completos do sistema ILP. O primeiro

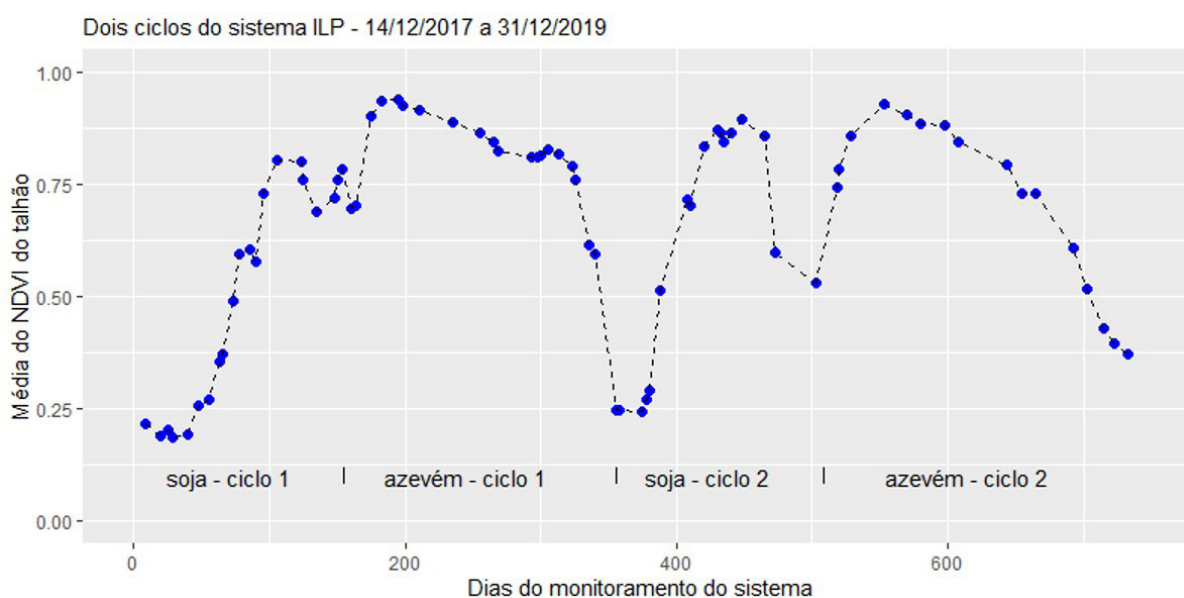


Figura 2. Dinâmica do NDVI médio durante dois ciclos completos do sistema ILP.

ciclo iniciou-se com o plantio da soja em dezembro de 2017, sucedida pelo azevém a partir de maio de 2018, até o novo plantio da soja, em dezembro de 2018. De forma similar ao primeiro ciclo, a soja foi sucedida pelo azevém (maio 2019) até a sua senescência no final de 2019. Podemos verificar no gráfico que o $NDVI_m$ é mais baixo nos dois momentos imediatamente após o plantio da soja, realizada pelo sistema de plantio direto sobre a palha do azevém do ciclo anterior. Após algumas semanas sem alteração significativa, o $NDVI_m$ da cultura da soja passa a crescer de forma rápida, até o fim dos estágios vegetativos, quando alcança um platô correspondente aos estágios reprodutivos da soja.

Crusiol et al. (2013), usando um instrumento de campo, levantou a curva do NDVI em função dos estágios fisiológicos de uma variedade específica da soja (BRS 284). Este estudo mostrou o crescimento acentuado dos valores do NDVI nos estágios vegetativos, e pequena variação nos estágios reprodutivos, com um pico do NDVI no estágio reprodutivo R4, denominado de estágio de vagem completamente desenvolvida (Neumaier et al., 2000). Infelizmente, não dispúnhamos de observações de campo para verificarmos esta relação. Após o ápice, nos estágios correspondentes à maturação das plantas (R7 e R8), o NDVI da soja entra em declínio, até a sua colheita. Logo após a colheita da soja, tanto no primeiro quanto no segundo ciclos aqui avaliados, o $NDVI_m$ não foi tão baixo como após o plantio da soja porque no campo provavelmente já existiam plantas do azevém, que rebrotam espontaneamente a partir do declínio da soja. Nos ciclos do azevém também ocorre um rápido aumento do $NDVI_m$, chegando ao ápice em torno de 40 dias após a colheita da soja. A partir daí, a cultura passa por um longo declínio, até atingir o estágio final, com queda mais acentuada dos valores de $NDVI_m$.

O comportamento do NDVI está diretamente associado à disponibilidade hídrica no solo. A pluviometria nos dois ciclos do sistema ILP foram bem distintas, sobretudo nos 90 Dias Após Semeadura (DAS) da soja. A Figura 3 detalha melhor a dinâmica do $NDVI_m$, separando os dois anos em gráficos distintos e mostrando em outro quadro (imediatamente abaixo) a distribuição diária da precipitação. No primeiro ciclo, a precipitação total até 90 DAS foi de 160,1 mm, e no segundo foi de 649,0 mm (quatro vezes maior).

A baixa intensidade e a má distribuição das chuvas provavelmente foram as responsáveis pela descontinuidade do crescimento da curva do $NDVI_m$ no primeiro ciclo da soja, exatamente no período correspondente aos ciclos vegetativos. Os dados que registraram esta inesperada queda do NDVI são relativos à passagem de 14/03/2018, correspondente a 90

DAS, imediatamente depois de uma estiagem de 11 dias. O maior valor registrado para o $NDVI_m$ no primeiro ciclo da soja foi 0,80, obtido na passagem de 29/03/2018 (105 DAS). Para o segundo ciclo da soja, o pico do $NDVI_m$ foi de 0,89, na passagem de 07/03/2019 (110 DAS). A produtividade da soja nos anos de 2018 e 2019 foram, respectivamente, 1,04 e 2,81 t/ha. Nota-se que a produtividade de 2018 foi fortemente afetada pela baixa disponibilidade hídrica.

Para o azevém, o pico do $NDVI_m$ no primeiro ciclo foi de 0,94, a 40 dias após a colheita da soja (40 DAC) referente à passagem de 27/06/2018. No segundo ciclo, o pico do $NDVI_m$ foi de 0,93, a 45 DAC, em 20/06/2019. Utilizamos a sigla DAC para referenciar o início do ciclo o azevém, em analogia à conhecida DAS, porque no sistema ILP avaliado não há uma semeadura para o azevém, que é manejado para a ressemeadura natural ao final do ciclo. Assim, o pasto se estabelece naturalmente, a cada período frio, a partir das sementes disponíveis no solo.

Outra informação disponibilizada na Figura 3 é o desvio-padrão (DP) do NDVI para cada passagem. O DP é uma boa indicação da variabilidade espacial das culturas de soja e azevém. Analisando os dois ciclos, vemos que o DP encontrado para a soja foi bem maior que o do azevém na plenitude das culturas nos dois ciclos, e os DP são maiores nas etapas correspondentes ao maior crescimento e nas fases finais dos ciclos em ambas as culturas.

Na Figura 4 são mostrados 16 mapas de NDVI para o sistema ILP em diferentes momentos, todos em uma mesma escala de cores para permitir a comparação entre as diferentes fases do sistema. São quatro passagens mapeadas para cada cultura nos dois ciclos. Neste conjunto de mapas, fica perceptível a variabilidade espacial do NDVI, demonstrando a importância da resolução espacial dos dados orbitais, sobretudo dentro da abordagem da Agricultura de Precisão, na qual a variabilidade interna do talhão é considerada. A resolução espacial de 10 m do Sentinel-2 fornece 100 amostras/ha. Outro fato perceptível foi que o azevém nos dois ciclos teve um desenvolvimento mais homogêneo que a soja.

Analisando os primeiros 4 mapas, correspondentes ao primeiro ciclo da soja, vemos que, na passagem de 03/01/2018 (20 DAS), a soja ainda não tem área foliar suficiente para afetar de forma significativa o NDVI e a imagem apresenta-se bem homogênea. Em 02/03/2018 (79 DAS), o NDVI apresenta um crescimento rápido relativo ao mapa anterior, e com grande variabilidade espacial (DP = 0,067). Esta passagem registrou o maior DP no primeiro ciclo da soja. Em 29/03/2018 (105 DAS), foi registrado o pico do $NDVI_m$ (0,80) para a soja no primeiro ciclo, um valor ruim, indicando

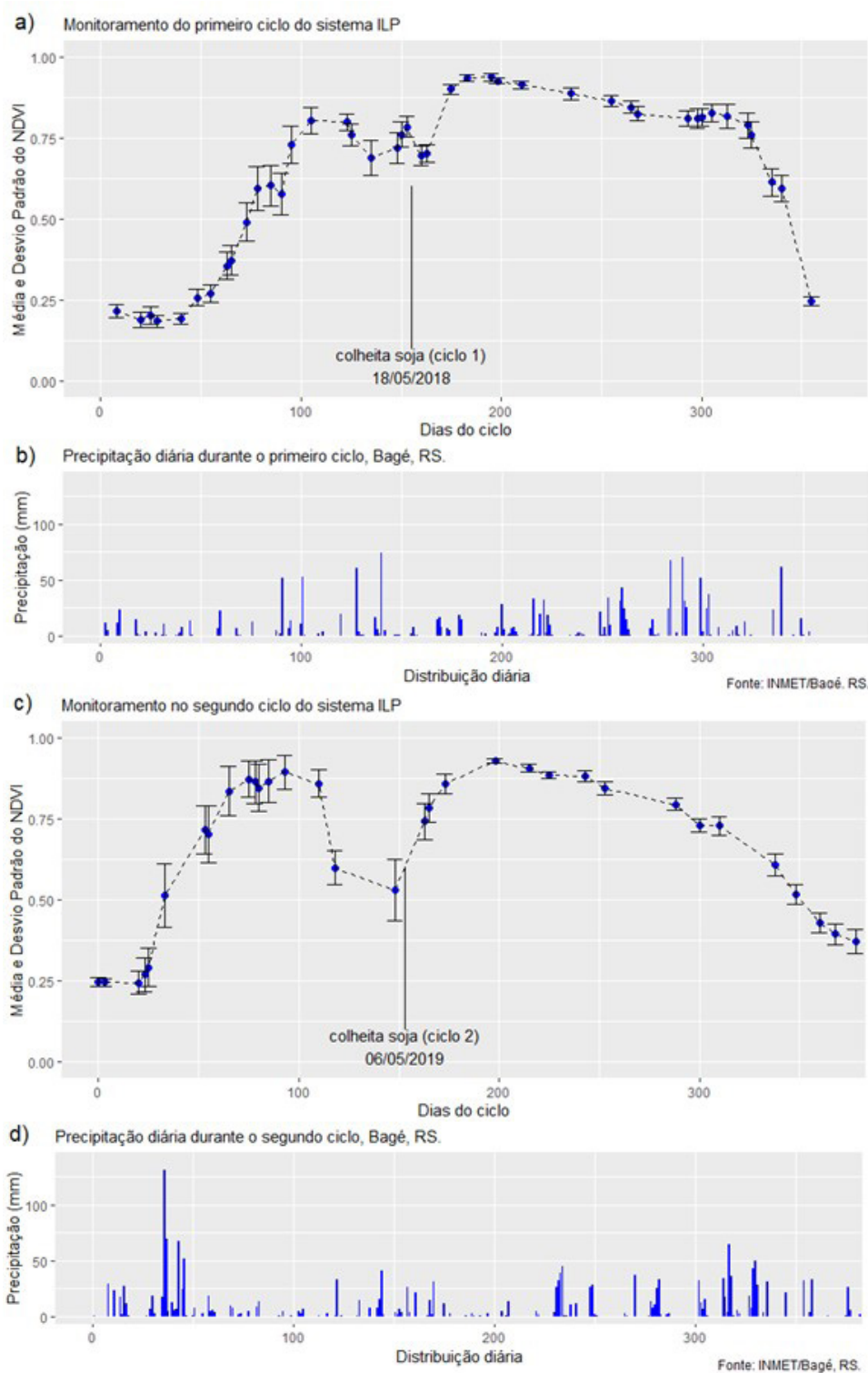


Figura 3. a): Dinâmica do NDVI médio ao longo do primeiro ciclo; b): Precipitação pluvial diária durante o primeiro ciclo; c): Dinâmica do NDVI médio ao longo do segundo ciclo; e d) Precipitação pluvial diária durante o segundo ciclo.

um desenvolvimento abaixo do esperado. O mapa de NDVI para a passagem de 16/05/2018 (153 DAS), há dois dias antes da colheita, resultou em um $NDVI_m = 0,79$, quase no mesmo nível do pico do ciclo.

O primeiro mapa do primeiro ciclo do azevém é relativo à passagem de 23/05/2018, cinco dias após a colhei-

ta da soja (5 DAC). Em 27/08/2018 (40 DAC), foi obtido o pico do $NDVI_m$ para o azevém (0,94) e um DP: 0,012, mostrando o bom desenvolvimento do azevém e pouca variabilidade espacial em comparação com a soja. Este valor para o pico do $NDVI_m$ é também o maior valor entre todas as 72 medidas. Em 02/11/2018 (168 DAC),

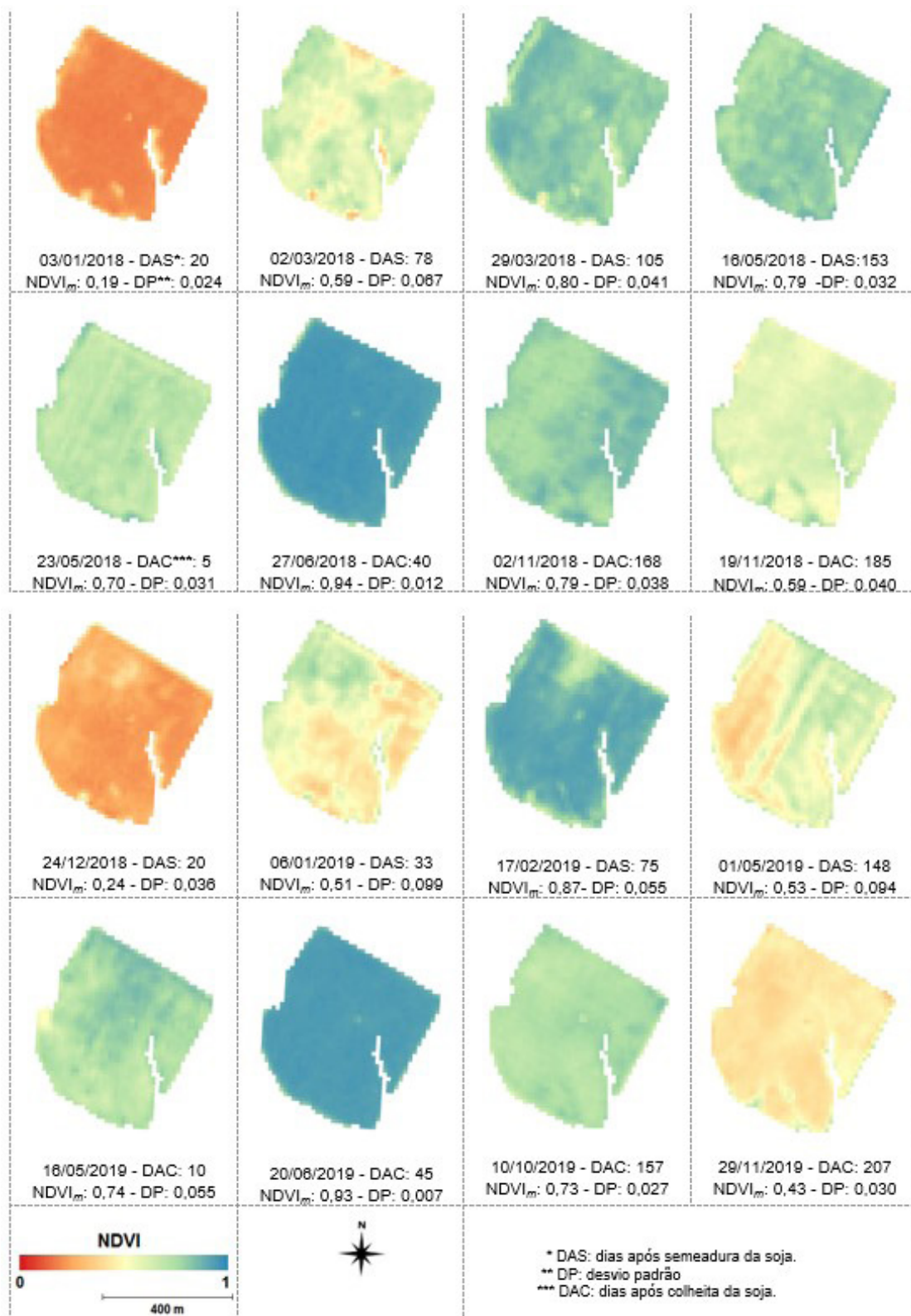


Figura 4. Mapas do NDVI ao longo dos dois ciclos do sistema ILP.

mais de quatro meses depois, o NDVI_m registrado foi de 0,79, mostrando que, após o ápice, a queda do NDVI é relativamente lenta. É claro que a velocidade da queda depende de fatores ambientais, como a precipitação, e de manejo do sistema, como a lotação animal do

pasto, por exemplo. Entretanto, uma queda suave é o comportamento desejável para a fase pastagem do sistema ILP. A partir desta data, a senescência do azevém acentua a queda do NDVI e, em 19/11/2018 (185 DAC), o NDVI_m foi de 0,59 com o DP = 0,040.

O mapa NDVI de 24/12/2018 (20 DAS) registra o início do segundo ciclo da soja, mostra novamente um NDVI_m baixo. Em 06/01/2019 (33 DAS), há um forte crescimento do NDVI_m (0,51), apresentando a maior variabilidade encontrada para todas as passagens analisadas (DP = 0,099). O pico do NDVI_m (0,87) para o segundo ciclo da soja foi registrado na passagem de 17/02/2019 (75 DAS). A maior disponibilidade hídrica no segundo ciclo afetou não somente o vigor da soja (indicado pelo NDVI_m), como encurtou o tempo para a cultura atingir o auge. O mapa de NDVI de 01/05/2019 (148 DAS) corresponde ao final do ciclo da soja, que foi colhida 5 dias depois desta passagem.

No segundo ciclo do azevém, a primeira passagem aproveitável após a colheita da soja foi em 16/05/2019 (10 DAC). Com mais 35 dias foi registrado o ápice do NDVI_m (0,93). Como houve um grande período sem imagem aproveitável (25 dias), é provável que o ápice do azevém tenha ocorrido um pouco antes desta data. A variabilidade encontrada para esta passagem é a menor de todas as imagens analisadas (DP = 0,007), mostrando que o desenvolvimento do azevém foi bem mais homogêneo que a soja, pelo menos nos dois ciclos avaliados. Ressalta-se que a disponibilidade hídrica no solo tende a ser maior durante o período frio, onde a radiação incidente e a taxa de evapotranspiração são menores. Em 10/10/2019 (157 DAC), o NDVI_m foi de 0,73 e no último mapa, em 29/11/2019 (207 DAC), o NDVI_m de 0,43 devido ao final do ciclo do azevém.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o monitoramento do NDVI ao longo de dois ciclos completos do sistema ILP se mostraram bastante coerentes quando confrontados com outros dados do sistema, como a produtividade da soja e a intensidade e distribuição da precipitação pluvial. Além disso, quando se comparam os valores do NDVI extraídos de passagens próximas, entre 2 e 3 dias, percebemos que os resultados estão consistentemente próximos. No entanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado para saber em que medida podemos usar os valores obtidos para o NDVI como referência para a tomada de decisão na gestão de um sistema agrícola, como, por exemplo, estimar a biomassa disponível na fase pasto, a fim de determinarmos a taxa de lotação ou nível de desfolha recomendado para as diferentes zonas no campo. Outro estudo pretendido no futuro próximo é verificar se existe correlação do mapa de produtividade da soja com os mapas de NDVI em diferentes estágios de desenvolvimento. O monitoramento a partir do NDVI de sistemas agrícolas usando imagens do Sentinel-2 ou de outras cons-

telasões atuais e futuras certamente será uma ferramenta importante, pois produz informação relevante e atualizada. As imagens do Sentinel-2 são disponibilizadas quase que imediatamente no repositório após a passagem dos satélites sobre o campo, de forma gratuita. O processo de produção das informações é razoavelmente simples e rápido.

REFERÊNCIAS

- CRUSIOL, L. G. T.; NEIVERTH, W.; RIO, A.; SIBALDELLI, R. N. R.; FERREIRA, L. C.; CARVALHO, J. F. C.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. NDVI de estádios de desenvolvimento da soja BRS 284 em condições de campo. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, VIII, 2013. **Anais** [...]. Londrina: Embrapa Soja, 2013. p. 87-91.
- EBERHARDT, I. D. R.; SCHULTZ, B.; RIZZI, R.; SANCHES, I. D.; FORMAGGIO, A. R.; ATZBERGER, C.; MELLO, M. P.; IMMITZER, M.; TRABAQUINI, K.; FOSCHIERA, W.; LUIZ, A. J. B. Cloud cover assessment for operational crop monitoring systems in tropical areas. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 219, 2016.
- ESA. **Sen2Cor**: configuration and user manual. 2018. Disponível em: http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.5.5/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.5.5_V2.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.
- ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ANTUNES, J. F. G. Uso de perfis multi-temporais de NDVI/AVHRR no acompanhamento da cultura da soja no oeste do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVIII (SBSR), 2009, Natal. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 145-150.
- FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 288 p.
- GURGEL, H. da C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 85-90, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100014>.
- NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATO, E. R. (ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 19-44
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings** [...]. Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.
- TRINDADE, F. S.; ALVES, M. de C.; NOETZOLD, R.; ANDRADE, I. C. de; POZZA, A. A. A. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-11, 2019.