

Análise de ciclos harmônicos de séries temporais de dados NDVI/MODIS para a discriminação de culturas agrícolas anuais

Alexandre Camargo Coutinho¹
Júlio César Dalla Mora Esquerdo¹
João Francisco Gonçalves Antunes^{1,2}

¹Embrapa Informática Agropecuária
Av. André Tosello, 209 - Barão Geraldo
CEP 13083-886 - Campinas, SP
{alex.coutinho, julio.esquerdo, joao.antunes}@embrapa.br

²Doutorando da Faculdade de Engenharia Agrícola - Feagri/Unicamp
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas - SP, Brasil

Abstract. This article presents the preliminary results of a methodological development to identify, discriminate and map crops and associations of agricultural crops grown in the state of Mato Grosso, Brazil, during a specific cropping year. There are many origins and motivations demanding information about spatial and temporal dynamic of the national agricultural activity. Annual crops estimations, pricing, environmental impacts and public policies formulation for the agricultural sector are just some of the most obvious activities related to the benefit of the generation of more reliable and temporally synchronized data with the development of agricultural activities in the field. Despite the limitations of the coarse spatial resolution of MODIS images, its potential, based on the acquisition and provision of daily images, has not been exhausted. In this context, the objective of this study was to analyze annual crop areas in the State of Mato Grosso using harmonic analysis applied to NDVI time-series data throughout the 2008/2009 cropping year using the HLS representation of the harmonic terms. The results of this method, applied to different regions and backgrounds lands, have showed the potential of MODIS time-series in the activity of annual crop types mapping, or association of crop types, through the visual interpretation of HLS representation of the harmonic terms.

Palavras-chave: harmonic analysis, agriculture, time-series, NDVI, análise harmônica, agricultura, séries temporais.

1. Introdução

As crescentes demandas para a ampliação da capacidade de monitoramento da dinâmica do uso e cobertura da terra, tanto em termos da promoção de ganhos no detalhamento dos objetos na superfície, quanto no que se refere ao aumento da sua frequência e sistematização, têm apresentado inúmeros desafios para as áreas da ciência relacionadas à pesquisa desenvolvimento e inovação em geotecnologias.

As regiões tropicais são especialmente susceptíveis às dinâmicas impostas pela atividade agrícola, envolvendo, entre outras coisas, transições entre diferentes formas de uso e cobertura da terra, degradação e erradicação dos sistemas naturais, com as consequentes alterações na sua biodiversidade (Lambin *et al.*, 2003).

No Brasil, em função da sua dimensão territorial continental e da importância econômica da atividade agrícola para constituição do saldo positivo da balança comercial nacional, esse quadro se agrava sobremaneira e exige, constantemente, por parte do Governo Federal, a formulação de políticas públicas para direcionar e orientar os investimentos do setor e promover o seu crescimento de forma mais ordenada e sustentável (Rudorf *et al.*, 2011).

Se por um lado o excelente desempenho da agricultura nacional figura como sendo consequência do desenvolvimento tecnológico dos setores produtivo e industrial, por outro, a persistência de taxas significativas de degradação ambiental, sobretudo dos biomas Amazônia e Cerrado, em prol da expansão da atividade agrícola (Morton *et al.*, 2006), têm dificultado a comercialização de algumas commodities agrícolas brasileiras no mercado internacional.

Nesse complexo cenário, no qual a principal atividade promotora do desenvolvimento econômico do país entra em aparente conflito com as demandas globais pela preservação dos sistemas naturais, é imperativo que haja uma ampliação da capacidade de monitoramento e gestão do território nacional, para ampliar a sinergia e potencializar o aproveitamento das oportunidades apresentadas por ambos os setores.

A redução dos custos operacionais e do tempo gasto para realização da atividade de monitoramento territorial é, certamente, uma das principais dificuldades enfrentadas para sua operacionalização em escala nacional. O sensoriamento remoto tem se firmado como a alternativa mais promissora para realização das atividades de identificação, delimitação e mapeamento do uso e cobertura da terra, sobretudo pela escala cartográfica e frequência exigida para sua sistematização (Clark *et al.*, 2010).

Plataformas de sensores remotos como a Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), cuja disponibilização de dados é gratuita, têm sido apontadas como potencialmente adequadas para executar esse tipo de tarefa e têm sido intensamente testadas e utilizadas na última década, sobretudo em abordagens regionais e nacionais.

Se por um lado a moderada resolução espacial das imagens MODIS apresenta inúmeros problemas quando as mesmas são empregadas em regiões nas quais a repartição espacial das propriedades rurais define uma paisagem muito recortada, na forma de mosaico, por outro, essas imagens têm sido empregadas para o mapeamento e monitoramento da dinâmica da agricultura de grãos na região da Amazônia brasileira, incluindo processos de expansão e intensificação da agricultura (Brown *et al.*, 2007; Coutinho *et al.*, 2011; Epiphanyo *et al.*, 2010; Victoria *et al.*, 2009) e seus impactos sobre os ciclos biogeoquímicos (Foley *et al.*, 2005; Galford *et al.*, 2010; Galford *et al.*, 2011; Wohl *et al.*, 2012) e sobre o fenômeno dos desflorestamentos (Anderson *et al.*, 2005; Barona *et al.*, 2010).

Focado no desenvolvimento metodológico e na ampliação dessa capacidade de monitoramento das atividades agrícolas, este trabalho desenvolveu e testou uma abordagem de representação de ciclos harmônicos de séries temporais de produtos MODIS, para o mapeamento da agricultura no Estado de Mato Grosso, tomando como base a metodologia proposta por Antunes *et al.* (2012), proposta para o mapeamento da paisagem da bacia do alto Paraguai.

Os resultados obtidos neste trabalho de mapeamento de culturas agrícolas no estado de Mato Grosso são fortes evidências de que o método empregado evidencia a prática de culturas específicas e associações de culturas, tanto em polígonos com ciclos agrícolas de safra, quanto de safra/safrinha. Apesar das diferentes culturas e associações de culturas terem ficado evidentes na análise visual das imagens resultantes da abordagem proposta, ainda precisam ser executados testes com classificadores automáticos e supervisionados, para a avaliação do potencial do emprego do método em abordagens sistemáticas regionais e nacionais.

2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi realizado no estado de Mato Grosso, maior produtor de grãos e de algodão do Brasil. Como referência terrestre para a análise dos resultados foram consideradas informações sobre o histórico de cultivo de um conjunto composto por mais de 400 talhões visitados e georreferenciados, localizados nas principais regiões produtoras de soja, milho e algodão no Estado.

O índice de vegetação utilizado nesse trabalho foi o NDVI (Rouse *et al.*, 1973), gerado a partir do sensor MODIS, com o propósito de representar a dinâmica da biomassa das culturas ao longo do seu ciclo produtivo. A série temporal de imagens de NDVI/MODIS compreendeu o ano-safra 2008/2009, contendo 23 composições de 16 dias, entre os meses de setembro de 2008 a agosto de 2009, de modo a contemplar as épocas de safra e safrinha na região de estudo. As imagens da série temporal foram obtidas do Banco de Produtos MODIS na Base

Estadual Brasileira, um repositório mantido pela Embrapa Informática Agropecuária, no qual são disponibilizadas imagens de NDVI derivadas do produto MOD13Q1 (produzido pelo LP-DAAC/EOS – Land Processes Distributed Active Archive Center/NASAs Earth Observing System), em recortes estaduais na projeção geográfica e em formato GeoTIFF (Esquerdo *et al.*, 2011).

Inicialmente, foram gerados gráficos dos perfis espectro-temporais de talhões de referência, de forma a representar o comportamento do NDVI ao longo dos ciclos produtivos de safra e safrinha. Para a extração dos dados, foram consideradas as coordenadas centrais de um conjunto de pixels localizados em talhões com os seguintes usos nos períodos de safra e safrinha: soja/milho, soja/algodão, soja/milheto, soja/pousio, somente algodão e pastagem. A extração dos dados e a geração dos perfis foram realizadas por meio de uma rotina escrita em linguagem IDL (Interactive Data Language). Para reduzir os efeitos decorrentes da presença de nuvens nas composições MODIS, que interferem no valor do NDVI, foi utilizado o filtro proposto por Wardlow *et al.* (2006), no qual os valores inconsistentes do índice de vegetação são detectados e eventualmente substituídos pelo menor valor adjacente.

Para analisar as séries temporais de NDVI foi utilizada a Transformada de Fourier, a qual tem a finalidade de decompor uma função complexa, formada pela somatória de ondas senoidais e cossenoidais, onde cada onda é definida por um valor único de amplitude e fase, conforme ilustrado na Figura 1.

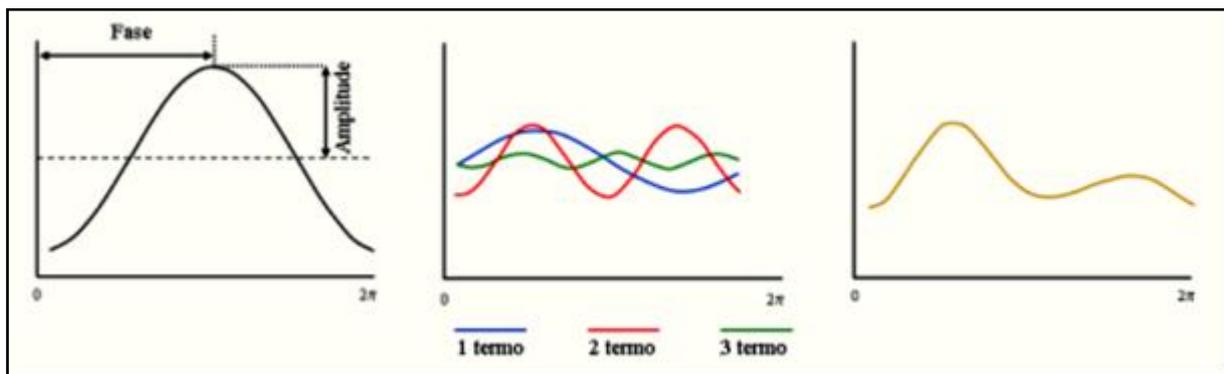


Figura 1: Representação dos termos harmônicos gerados pela Transformada de Fourier. Fonte: Pardi Lacruz (2006), adaptado de Jakubauskas *et al.* (2001).

A amplitude corresponde à metade do valor no qual a função é maximizada e a fase é o deslocamento entre a origem e o pico da onda no intervalo de 0 até 2π . Cada harmônico (termo) representa o número de ciclos completados por uma onda num determinado intervalo de tempo e é responsável por um percentual da variância total da série temporal original. Assim, o primeiro harmônico tem um período T igual ao período total em estudo, o segundo harmônico corresponde à metade do período do primeiro harmônico $T/2$, o terceiro harmônico a $T/3$ e assim sucessivamente (Pardi Lacruz, 2006).

A aplicação da Transformada de Fourier na série temporal visa decompor a variação anual do NDVI em harmônicos que representem a média e as oscilações temporais com o propósito de identificar alvos da superfície terrestre. A imagem harmônico zero (termo aditivo) corresponde à média do NDVI e representa o vigor total para cada tipo de cobertura vegetal durante o período em estudo. As imagens amplitude indicam a variação máxima do NDVI para todo o período. A fase indica o tempo, ao longo da série temporal, em que acontece o máximo valor de amplitude. O intervalo dos valores das imagens fase é de 0° a 360° e pode ser associado com os meses do ano.

O processamento das séries temporais de NDVI foi realizado por meio do pacote computacional HANTS (Harmonic Analysis of NDVI Time-Series), desenvolvido originalmente por Roerink *et al.* (2000) e implementado em linguagem IDL por De Wit e Su (2005). O conceito básico do algoritmo é que o desenvolvimento da vegetação apresenta um forte efeito sazonal que pode ser simulado por funções senoidais de baixa frequência, com diferentes fases e amplitudes. As nuvens provocam alterações nas séries temporais e podem ser consideradas como ruídos de altas frequências. O algoritmo HANTS analisa a série temporal original, identifica as áreas de baixas frequências referentes à vegetação e, a partir da Transformada de Fourier, elimina os valores discrepantes da série temporal que representam altas frequências.

Representações visuais das imagens amplitude e fase dos termos harmônicos podem auxiliar a interpretação do uso da terra através da associação e adoção de combinações de cores. Porém, considerando que a fase é quantificada numa escala circular, fica difícil a interpretação de imagens no espaço de cores RGB, no qual ocorre uma mudança abrupta da cor escura para a cor brilhante. Já no espaço de cores HLS, a componente matiz é inerentemente circular, proporcionando um efeito visual de transição suave, do azul para o magenta e daí para o vermelho. Os outros parâmetros harmônicos são lineares e podem ser bem representados nas componentes de luminosidade ou saturação (Hall-Beyer, 2007).

Dessa forma, para analisar a condição de crescimento das culturas, em especial a informação de fase, a transformação HLS foi aplicada aos termos harmônicos obtidos com o algoritmo HANTS, segundo o procedimento desenvolvido por Foley e Van Dam (1984).

3. Resultados e Discussão

Após a definição dos limites do período considerado para a composição da série histórica de dados NDVI do MODIS e a subsequente aplicação do filtro para suavização do efeito dos ruídos, foi efetuada a caracterização do comportamento espectro-temporal das culturas e associações de culturas agrícolas, com base nos dados coletados em campo. A Figura 2 ilustra o padrão espectro-temporal de algumas situações encontradas na área de estudo e evidencia as dificuldades enfrentadas na separação de classes, considerando-se a dispersão de valores dos conjuntos de pixels de cada classe polígono.

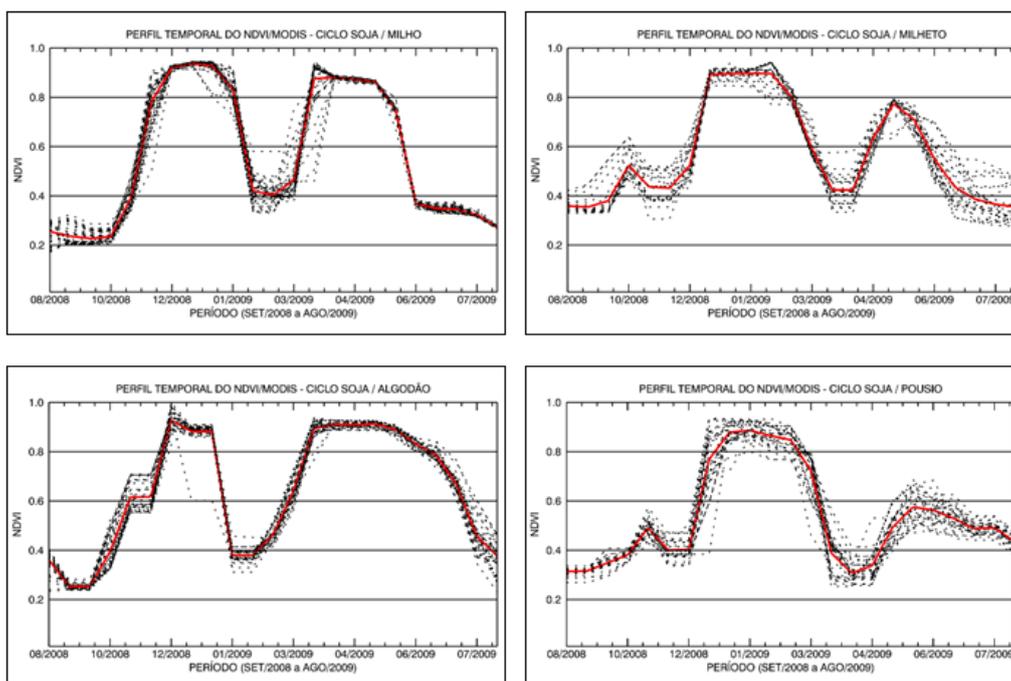


Figura 2: Perfis temporais médios (vermelho) de culturas e associações de culturas.

Resultados preliminares obtidos a partir da transformação HLS, aplicada aos termos harmônicos gerados com o algoritmo HANTS, considerando o período completo da série temporal analisada, mostraram que a técnica foi capaz de auxiliar na discriminação de coberturas vegetais com comportamentos espectro-temporais bastante distintos, como agricultura, pastagem e floresta. No entanto, houve dificuldade na discriminação de superfícies com comportamento espectro-temporal semelhante, como é o caso das diferentes culturas agrícolas analisadas neste estudo, por conta do baixo contraste observado na imagem gerada pela transformação HLS. Dessa forma, visando aumentar a capacidade de discriminação de cultivos agrícolas, fez-se a aplicação da transformação HLS aos termos harmônicos gerados com o algoritmo HANTS, porém considerando um período menor da série temporal, compreendendo as datas entre o pico vegetativo da primeira safra (dezembro) e o pico vegetativo da segunda safra (maio). Ao se adotar um período menor, compreendendo as épocas de maior variação do NDVI, a imagem obtida da transformação HLS apresentou um contraste maior entre as superfícies com comportamento espectro-temporal semelhante, conforme ilustra a Figura 3.

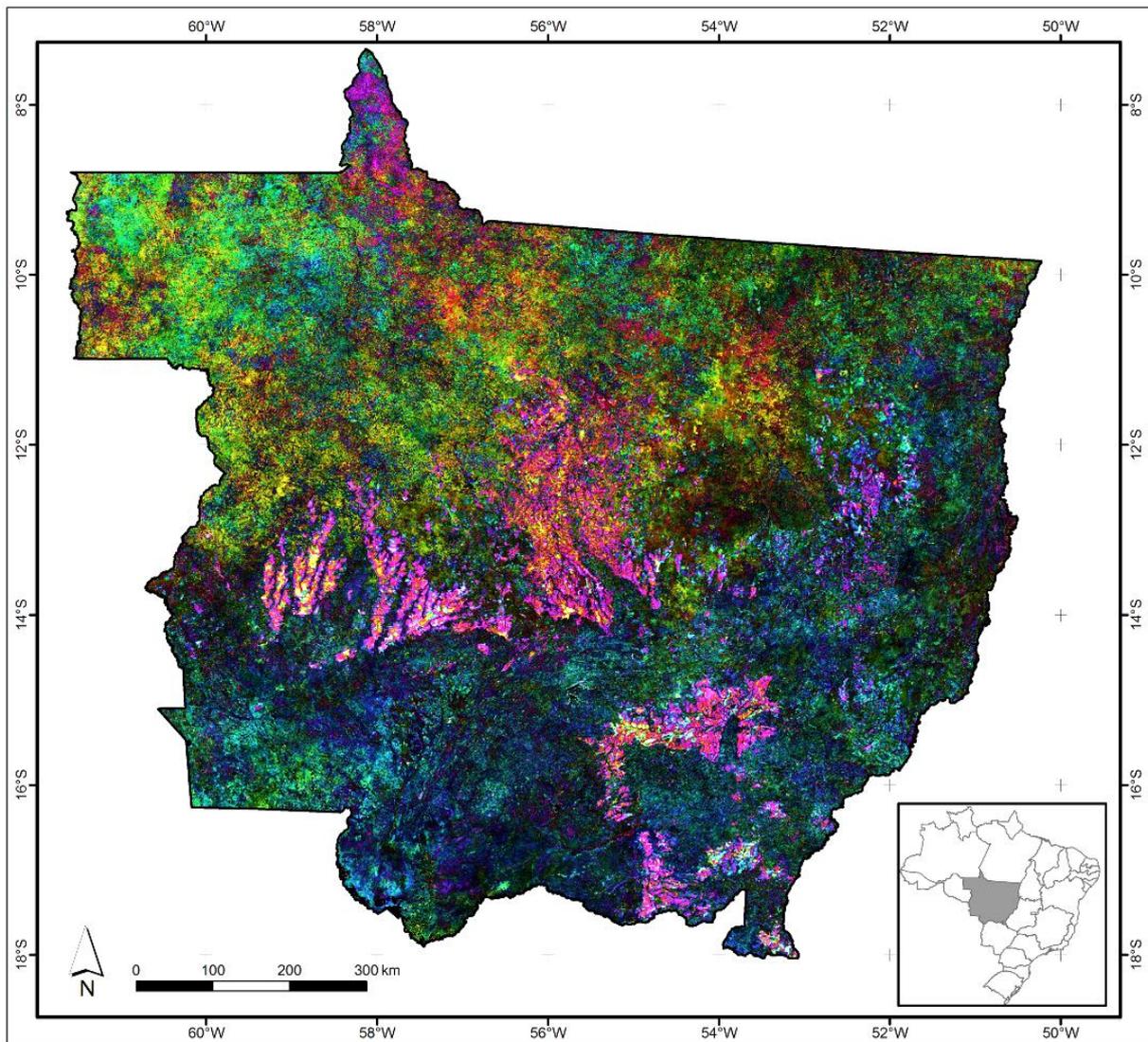


Figura 3: Representação visual das imagens amplitude e fase no espaço de cores HLS.

O comportamento da fase e amplitude na análise do uso da terra é indicativo do tipo de mudança que vem ocorrendo com o tempo. As mudanças sazonais somente na amplitude podem indicar variações no tipo de uso da terra ou nas condições da vegetação. As mudanças apenas de fase podem indicar variações no tempo de máximo vigor vegetativo. As mudanças na amplitude e na fase podem ser indicativas de transformações na superfície terrestre, relacionadas com a alteração do manejo do solo ou substituição da vegetação.

A imagem resultante mostrou, a partir de análises visuais, a distinção de padrões de cores distintos, para áreas ou talhões nos quais foram desenvolvidas diferentes culturas ou associações de culturas, como é o caso de talhões que apresentaram safra/safrinha (Figura 4). Nota-se que além de distinguir visualmente as diferentes culturas praticadas, é possível fazer a diferenciação das áreas com desenvolvimento de uma cultura anual como, por exemplo, as áreas de algodão e áreas com soja/pousio, áreas com duas culturas comerciais como, por exemplo, as áreas de soja/algodão e de soja/milho e, finalmente, as áreas com apenas uma cultura comercial e outra de cobertura como, por exemplo, as áreas de soja/milheto.

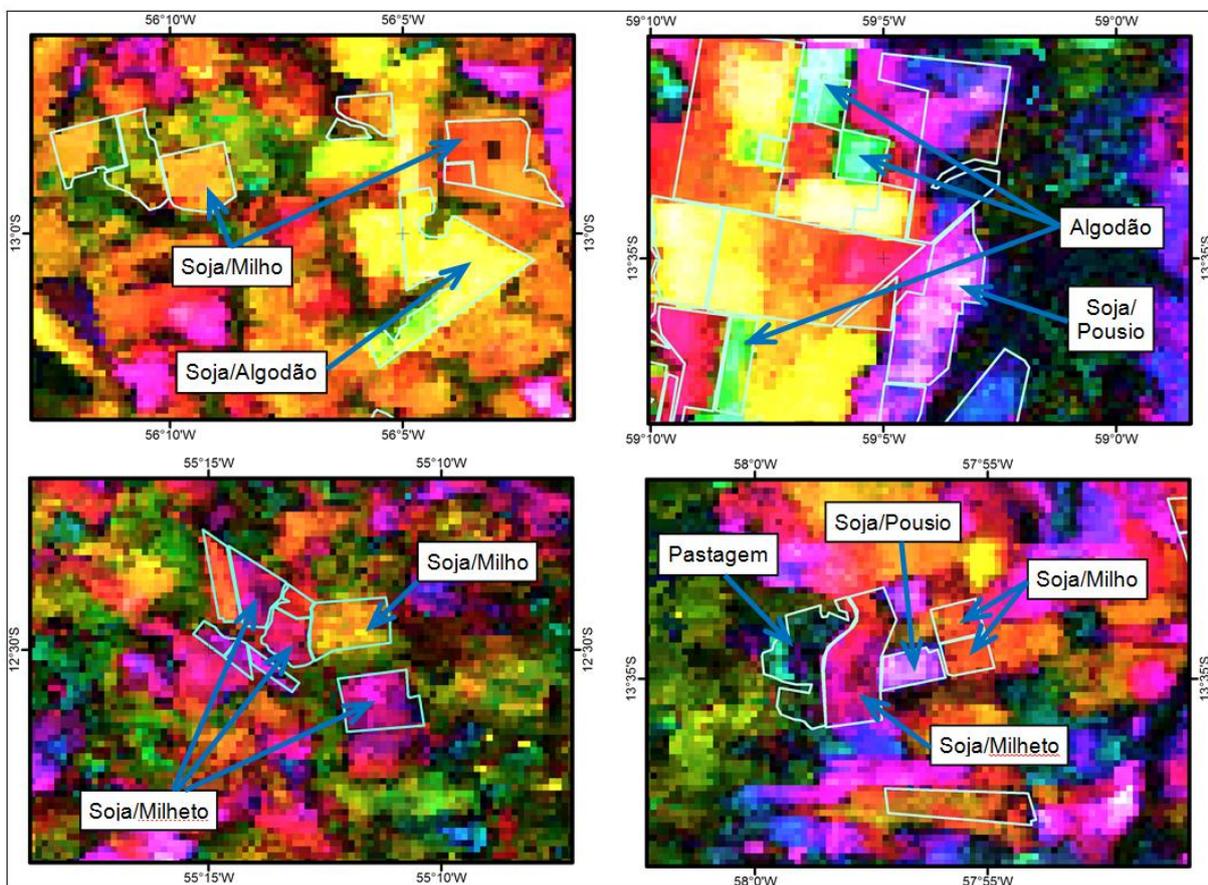


Figura 4: Detalhe da representação visual das imagens amplitude e fase no espaço de cores HLS, mostrando distintos padrões de cores característicos das culturas e associações de culturas, praticadas durante a safra 2008/2009.

4. Conclusões

Os resultados obtidos com a execução deste trabalho mostram que o potencial da adoção de séries históricas de dados de NDVI produzidos com imagens MODIS, para o mapeamento de culturas agrícolas específicas, ainda não foi exaustivamente explorado. Os ganhos obtidos, tanto em termos do contraste entre as cores, quanto da sua intensidade, com a transformação para o padrão HLS, foram bastante significativos e permitiram a diferenciação visual das áreas de cada cultura específica e, também das diferentes associações de culturas no mesmo

ano agrícola, como foram os casos da produção de safra e safrinha comerciais como, por exemplo, áreas de soja seguida de milho e de algodão seguido da soja, e de áreas de safra comercial, seguida de uma cultura de cobertura para preservação das qualidades físicas e químicas do solo como, por exemplo, soja seguida de milheto.

Apesar das limitações definidas pela moderada resolução espacial das imagens MODIS, após mais de uma década de investimento em pesquisa desenvolvimento e inovação com essas imagens, ainda há muito a ser explorado no que diz respeito à sua alta resolução temporal e à sua capacidade de produzir informações sobre a dinâmica de culturas agrícolas, sobretudo em áreas nas quais a repartição espacial das propriedades ou dos talhões define uma paisagem predominantemente composta por grandes unidades produtivas.

Referências Bibliográficas

Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E.; Defries, R. S.; Morton, D. Assessment of deforestation in near real time over the Brazilian Amazon using multitemporal fraction images derived from terra MODIS. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, vol. 2, n. 3, pp. 315–318, 2005.

Antunes, J. F. G.; Esquerdo, J. C. D. M.; Lamparelli, R. A. C.; Rodrigues, L. H. A. Representação de ciclos harmônicos temporais de produtos MODIS para análise da paisagem da bacia do alto Paraguai. In: Simpósio de Geotecnologias do Pantanal (GeoPantanal), 4, Bonito, MS. **Anais...** Brasília, Embrapa. 2012.

Barona, E.; Ramankutty, N.; Hyman, G.; Coomes, O. T. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, vol. 5, n. 2, 2010.

Brown, J. C.; Jepson, W. E.; Kastens, J. H.; Wardlow, B. D.; Lomas, J. M.; Price, K. P. Multitemporal, moderate-spatial-resolution remote sensing of modern agricultural production and land modification in the Brazilian Amazon. **Geoscience and Remote Sensing**, vol. 44, no. 2, pp. 117–148, 2007.

Clark, M. L.; Aide, T. M.; Grau, H. R.; Riner, G. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America, **Remote Sensing of Environment**, vol. 114, no. 1, pp. 2816–2832, 2010.

Coutinho, A. C.; Victoria, D. de C.; Paz, A. R. da; Brown, J. C.; Kastens, J. Dynamics of agriculture in the soy production pole of the state of Mato Grosso. **Proceedings of the Brazilian Symposium of Remote Sensing**, Curitiba, Brasil, vol. 30, pp. 6128–6135, 2011.

De Wit, A. J. W.; Su, B. Deriving phenological indicators from SPOT-VGT data using the HANTS algorithm. In: International SPOT-VEGETATION Users Conference, 2nd., **Proceedings...** Belgium: Antwerp, p. 195-201, 2005.

Epiphanyo, R. D. V.; Formaggio, A. R.; Rüdorff, B. F. T.; Maeda, E. E.; Luiz, A. J. B. Estimating soybean crop areas using spectral-temporal surfaces derived from MODIS images in Mato Grosso. Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 45, no. 1, pp. 72–80, 2010.

Esquerdo, J. C. D. M.; Antunes, J. F. G.; Andrade, J. C. Desenvolvimento do Banco de Produtos MODIS na Base Estadual Brasileira. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15. 2011. Curitiba-PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, pp. 7596-7602. 2011

Foley, J. D.; Van Dam, A. **Fundamentals of Interactive Computer graphics**. Addison-Wesley Publishing Company, 664 p., 1984.

Foley, J.; DeFries, R.; Asner, G.; Barford, C.; Bonan, G.; Carpenter, S.; Chapin, F.; Coe, M.; Daily, G.; Gibbs, H.; Helkowski, J.; Holloway, T.; Howard, E.; Kucharik, C.; Monfreda, C.; Patz, J.; Prentice, I.; Ramankutty, N.; Snyder, P. Global consequences of land use. **Science**, vol. 309, pp. 570-574, 2005.

Galford, G. L.; Melillo, J. M.; Kicklighter, D. W.; Cronin, T. W.; Cerri, C. E. P.; Mustard, J. F.; Cerri, C. C. Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. **Proceedings** of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 107, no. 46, pp. 19 649–19 654, 2010.

Galford, G. L.; Melillo, J. M.; Kicklighter, D. W.; Mustard, J. F.; Cronin, T. W.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C. Historical carbon emissions and uptake from the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, vol. 21, n. 3, pp. 750–763, 2011.

Hall-Beyer, M. IHS Co-representation of circular and non-circular variables using harmonic analysis parameters. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 5, pp. 416-421, 2007.

Jakubauskas, M. E.; Legates, D. R.; Kastens, J. H. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 4, pp. 461-470, 2001.

Lambin, E.F.; Geist, H. J.; Lepers, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, vol. 28, n. 1, pp. 205-241. 2003.

Morton, D. C.; DeFries, R. S.; Shimabukuro Y. E.; Anderson, L. O.; Arai, E.; Espirito-Santo, F. D.; Morissette, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proceedings** of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 103, n. 39, pp. 14 637–14 641. 2006.

Pardi Lacruz, M. S. **Análise de séries temporais de dados MODIS como uma nova técnica para a caracterização de paisagem e análise de lacunas de conservação**. 129 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

Roerink, G. J.; Menenti, M.; Verhoef, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 9, pp.1911-1917. 2000.

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., Washington, D. C., 1973. **Proceedings**... Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center., v. 1, pp. 309-317. 1973.

Rudorff, B. F. T.; Adami, M.; Aguiar, D. A.; Moreira, M. A.; Mello, M. P.; Fabiani, L.; Amaral, D. F.; Pires, B. M. The soy moratorium in the amazon biome monitored by remote sensing images. **Remote Sensing**, vol. 3, n. 1, pp. 185–202. 2011.

Victoria, D. de C.; Andrade, R.G.; Paz, A.R. da. Série temporal de imagens EVI/MODIS para discriminação de formações vegetais no Pantanal. **Geografia**, v.34, Número Especial, dezembro, p.721-730. 2009.

Wardlow, B.D.; Kastens, J.H.; Egbert, S.L. Using USDA Crop Progress Data and MODIS Time-Series NDVI for Regional-Scale Evaluation of Greenup Onset Date. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 72, n. 11, pp. 1225-1234. 2006.

Wohl, E.; Barros, A.; Brunzell, N.; Chappel, N. A.; Coe, M.; Gi-ambelluca, T.; Goldsmith, S.; Harmon, R.; Hendrickx, J. M. H.; Juvik, J.; McDonnell, J. Ogden, F. The hydrology of the humid tropics. **Nature Climate Change**, vol. 2, n. 9, pp. 655-662. 2012.