

Uso de imagens de sensoriamento remoto para identificação de variabilidade espacial em Agricultura de Precisão

Eduardo Antonio Speranza ¹
João Francisco Gonçalves Antunes ¹
Ricardo Yassushi Inamasu ²

¹ Embrapa Informática Agropecuária
Av. André Tosello, 209 - Caixa Postal 6041
13083-886 - Campinas - SP, Brasil
{eduardo.speranza, joao.antunes}@embrapa.br

² Embrapa Instrumentação
Rua 15 de Novembro, 1452 - Caixa Postal 741
13560-970 - São Carlos - SP, Brasil
ricardo.inamasu@embrapa.br

Resumo. A Agricultura de Precisão (AP) tem como principal objetivo aumentar o retorno econômico de uma lavoura, considerando o uso racional de insumos agrícolas a partir da identificação da variabilidade espacial dos atributos do solo e da cultura. Dentre esses atributos, aqueles que permitem a geração de mapas referentes a biomassa vegetal presente em alguns estágios de crescimento da lavoura, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) que indica a presença e o vigor da vegetação, podem auxiliar de maneira significativa na identificação da variabilidade espacial da área de cultivo. Este trabalho descreve um experimento para verificação da correlação espacial entre imagens de sensoriamento remoto em diferentes resoluções espaciais, em uma área de cultivo de grãos no estado de Mato Grosso. Os resultados mostraram boa correlação espacial entre mapas de NDVI obtidos a partir de imagens de melhor resolução, como as fornecidas pelos satélites Landsat-8 e Sentinel-2A, indicando que esse tipo de mapa pode ser utilizado para identificação da variabilidade espacial da lavoura e, conseqüentemente, tem grande potencial de aplicação em diferentes atividades de AP.

Palavras-chave: biomassa vegetal, correlação espacial, resolução espacial.

Abstract. Precision Agriculture (AP) has as main goal to increase the profit of a crop, regarding the rational use of agricultural inputs from the identification of the spatial variability of soil attributes and crop. Among these attributes, those that allow the building of maps of vegetal biomass present at some stages of crop growth, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) indicating the presence and vigor of vegetation can significantly help in the identification of the spatial variability of the area. This work describes an experiment to verify the spatial correlation between remote sensing images regarding different spatial resolutions in a grain cultivation area in the state of Mato Grosso. The results showed a good spatial correlation between NDVI maps obtained from better resolution images, such as those provided by the Landsat-8 and Sentinel-2A satellites, indicating the use of this type of map to identify the spatial variability of the crop and, consequently, has great potential for use in different PA activities.

Keywords: vegetal biomass, spatial correlation, spatial resolution.

1. Introdução

A Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de gestão agrícola que se utiliza de tecnologias e princípios relacionados à variabilidade espacial do solo e da cultura agrícola para execução de intervenções em campo de maneira espacialmente diferenciada (Pierce e Novak, 1999). O principal objetivo da utilização desse sistema é o aumento da produtividade e a economia de insumos agrícolas, a partir de ações que privilegiam a proteção ao meio ambiente (Bernardi et al., 2014; Molin et al., 2015). Desse modo, as diferentes atividades que podem ser realizadas em uma lavoura considerando conceitos de AP, tais como a aplicação de insumos e corretivos à taxa variada, semeadura com diferentes níveis de população, definição de lâmina de água para irrigação, dentre outras, dependem da identificação correta da variabilidade espacial.

A caracterização da variabilidade espacial do solo de uma área agrícola é tradicionalmente realizada a partir de análises laboratoriais de amostras georreferenciadas, onde é possível que sejam medidos, dentre outros, teores relacionados à textura e matéria orgânica disponível (Mzuku et al., 2005); bem como a partir de parâmetros físicos, tais como resistência a penetração, umidade e condutividade elétrica, cujas medidas são obtidas a partir de sensores de campo (Vaz et al., 2001; Kitchen et al., 2005). Já com relação à variabilidade espacial da cultura, além dos mapas de produtividade e qualidade de frutos (Milne et al., 2012), destaca-se o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Zhang et al., 2010; Pedroso et al., 2010; Chang et al., 2014). Segundo Zhang et al. (2010), mapas de NDVI podem ser utilizados como indicadores da biomassa vegetal presente em uma cultura. Assim, esses mapas podem ser correlacionados com mapas de produtividade (Liakos et al., 2015; Pantazi et al., 2016), cujas séries históricas permitem identificar grande parte da variabilidade espacial de uma área de cultivo agrícola (Molin et al., 2015).

O cálculo do NDVI com resolução espacial suficiente para atender atividades de AP pode ser realizado a partir de sensoriamento remoto de campo ou suborbital. Com relação ao sensoriamento de campo, sensores de refletância do dossel das plantas têm sido utilizados para esse fim em diferentes culturas, tais como milho (Solari et al. 2008), soja (Mourtzins et al., 2014), cana-de-açúcar (Inamasu et al., 2006) e viticultura (Tagarakis et al., 2013). Apesar de permitir a geração de mapas de NDVI com resolução espacial de poucos centímetros, para esse tipo de sensoriamento existe um custo de aquisição do equipamento ou do serviço por parte do produtor, além das dificuldades já conhecidas e erros que podem acontecer devido aos procedimentos utilizados para coleta de dados em campo. Já com relação ao sensoriamento remoto suborbital, mapas de NDVI com resolução espacial de poucos centímetros podem ser obtidas a partir de imagens oriundas de câmeras multiespectrais a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) (Jorge et al., 2014); ou com resolução espacial de até 5 m a

partir de imagens como as disponibilizadas pelos satélites GeoEye e WorldView¹. Entretanto, assim como ocorre com os sensores de campo, o sensoriamento remoto suborbital com esse nível de detalhamento pode demandar altos custos aos produtores, no que diz respeito à aquisição das imagens ou de equipamentos e serviços para a realização de sobrevoos.

Por outro lado, a disponibilidade de imagens de sensoriamento remoto orbital gratuitas têm aumentado consideravelmente nos últimos anos. O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo das plataformas orbitais do programa internacional EOS² (Earth Observing System), compostas pelos satélites TERRA e AQUA, proporciona a obtenção de imagens com moderada resolução espacial (250 m), com boa qualidade radiométrica e alta precisão geométrica. Devido à sua extensa série temporal, de cerca de 18 anos, os dados fornecidos pelo sensor MODIS são utilizados prioritariamente em atividades de monitoramento da dinâmica de ocupação de diferentes culturas agrícolas (Antunes et al., 2016; Zhang et al., 2016). Mais especificamente aplicáveis à área de AP, as imagens obtidas pelo sensor OLI (Operation Land Imager), a bordo do satélite Landsat-8³, com resolução espacial de 30 m; e do sensor MSI (MultiSpectral Instrument), a bordo do satélite Sentinel-2A⁴, com resolução espacial de 10 m, podem auxiliar efetivamente os usuários de AP na detecção da variabilidade espacial da cultura. Ao longo do tempo, essas imagens podem gerar séries históricas importantes para a identificação da dinâmica das culturas em uma resolução espacial que permita intervenções em nível de AP.

Este trabalho descreve um experimento realizado a partir de imagens de sensoriamento remoto de uma área experimental de cultura de grãos (milho, soja e algodão), localizada no município de Pedra Preta (MT). Foram utilizadas variações do índice de Moran (Moran, 1950) para analisar a correlação espacial existente entre imagens oriundas dos satélites supracitados entre abril e maio de 2018, período onde foram atingidos os valores máximos de NDVI para a safrinha de algodão cultivada no período na área de estudo. As seções subsequentes apresentam o objetivo do trabalho (Seção 2); os materiais e métodos utilizados (Seção 3); os resultados obtidos e as discussões geradas (Seção 4); e as conclusões e sugestões para trabalhos futuros (Seção 5).

2. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho foi identificar a correlação espacial existente em mapas de NDVI obtidos a partir de imagens de sensoriamento remoto com diferentes resoluções espaciais e, conseqüentemente, a aplicabilidade dessas imagens em atividades de agricultura de precisão em áreas de cultivo de grãos no estado de Mato Grosso.

3. Material e Métodos

Para o desenvolvimento do experimento, foi considerado um talhão experimental em produção de grãos da Fazenda Farroupilha no município de Pedra Preta, localizado na porção leste do planalto da Bacia do Alto Paraguai, no estado de Mato Grosso. O talhão possui uma área de aproximadamente 50 ha, com coordenadas centrais aproximadas -54,071 (longitude) e -16,878 (latitude), medidas em graus decimais considerando o *datum* WGS84 (Figura 1).

¹ Digital Globe Inc., Longmont, Colorado, USA, <http://www.digitalglobe.com>

² Earth Observing System, NASA, USA, <http://modis.gsfc.nasa.gov>

³ Landsat8 Mission, U.S. Geological Survey, USA, <http://www.usgs.gov>

⁴ Sentinel-2 Mission, European Space Agency, France, <http://earth.esa.int>



Figura 1 – Talhão experimental (destacado com contorno preto). Imagem: Google Maps (<http://maps.google.com>).

A Figura 2 exibe um gráfico contendo a porcentagem de transmissão atmosférica e as diferentes faixas de comprimento de onda ocupadas pelas bandas de diferentes sensores, dentre eles os que foram utilizados nesse trabalho.

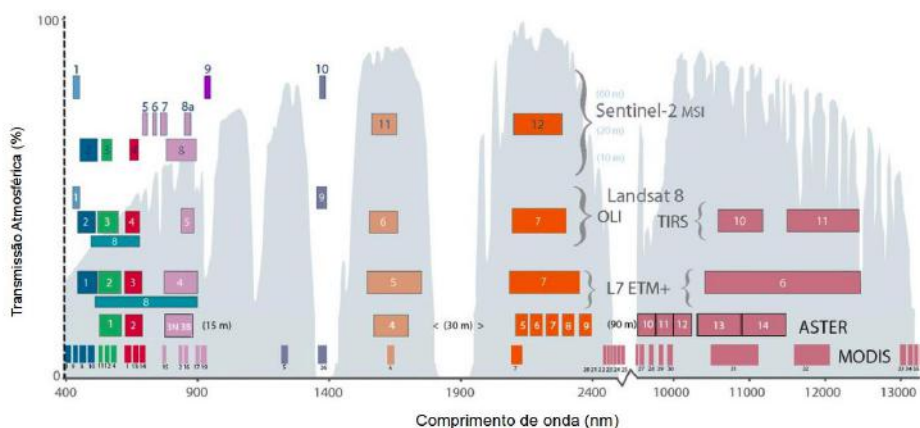


Figura 2 – Porcentagem de transmissão atmosférica e faixas de comprimento de onda ocupadas por bandas de diferentes sensores. Fonte: Adaptado de GIS and Remote Sensing Lecture Notes⁵.

De acordo com o gráfico da Figura 2, as bandas utilizadas pelos sensores MODIS (1 e 2), LandSat-8 (4 e 5) e Sentinel-2A (4 e 8) para cálculo do NDVI encontram-se na mesma faixa de espectro, proporcionando a possibilidade de comparação dos mapas.

Desse modo, os mapas de NDVI foram obtidos considerando os pixels das imagens que interceptam a área em destaque na Figura 1. O cálculo do índice para cada pixel deve ser realizado conforme a Equação 1 (Rouse et al., 1973).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Equação 1 – Cálculo do NDVI considerando as bandas NIR (infravermelho próximo) e *Red* (vermelho).

⁵ GIS and Remote Sensing Lecture Notes, http://geology.wlu.edu/harbor/geol260/lecture_notes/notes.html

Segundo informações fornecidas pelo produtor, as culturas de soja, milho e algodão, ora como safra, ora como safrinha, foram cultivadas na área experimental ao longo dos últimos cinco anos. Essa dinâmica pode ser observada por meio do perfil temporal médio de NDVI da área, originário de imagens do satélite TERRA/MODIS e disponibilizado pelo sistema SATVeg (Esquerdo et al., 2017) (Figura 3).

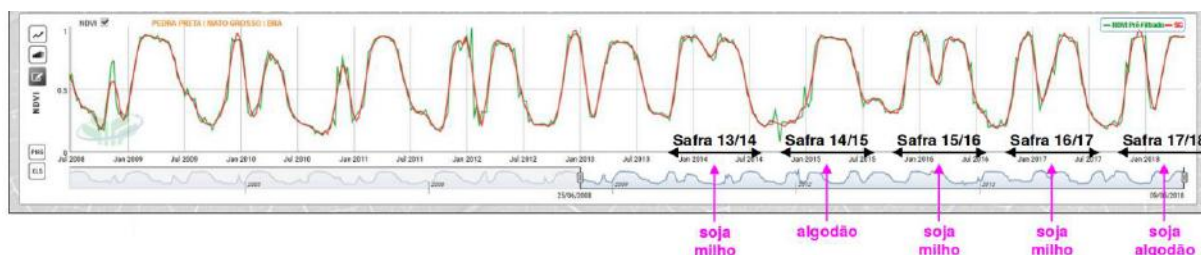


Figura 3 - Perfil temporal de NDVI obtido a partir do SATVeg.

A partir do perfil exibido na Figura 3, para a recente safrinha de algodão de 2018, é possível observar que o valor máximo de NDVI foi obtido entre o final do mês de abril e o início do mês de maio, que é o período de maior vegetativo da cultura com a maior cobertura sobre o solo. A partir dessa análise preliminar, foram selecionadas então uma imagem (sem cobertura de nuvens) oriunda de cada um dos satélites analisados dentro do período, para geração de mapas de NDVI. A Figura 4 exibe uma aproximação dos pontos centrais e respectivos pixels da imagem do satélite TERRA/MODIS cuja área está pelo menos 90% contida na área de estudo. Essa porcentagem foi considerada neste trabalho, por conta da existência de apenas dois pixels totalmente internos à área, dificultando a sua representação como um todo com relação à variabilidade espacial.

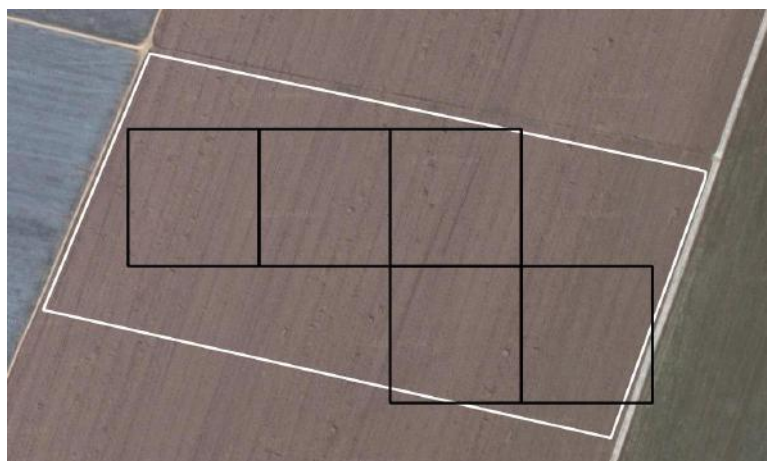


Figura 4 – Pixels TERRA/MODIS utilizados para geração de mapa de NDVI (contorno em preto) e que interceptam a área de estudo (contorno branco). Imagem: *Google Maps* (<http://maps.google.com>).

Os cinco pixels exibidos na Figura 4 foram selecionados para este estudo, e os valores de NDVI referentes ao pico vegetativo da cultura (em 09/05/2018) foram obtidos a partir do SATVeg, que já fornece esses valores calculados a partir dos produtos TERRA/MODIS obtidos com todos os níveis de correção já realizados, incluindo a correção atmosférica.

Com relação às imagens de maior resolução espacial, foram realizadas buscas em provedores oficiais com o intuito de encontrar as cenas sem cobertura de nuvens e o mais

próximo possível do período estudado. A imagem Landsat-8/OLI foi obtida no dia 04/05/2018, por meio do provedor Earth Explorer⁶, já com correção no nível 1-C. Foram utilizados os 527 pixels que interceptam a área de estudo. Já a imagem Sentinel-2A/MSI foi obtida no dia 09/05/2018, por meio do provedor Copernicus Open Access Hub⁷ também com correção nível 1-C. Foram utilizados os 4.555 pixels que interceptam a área de estudo. A correção atmosférica para ambas as imagens foi realizada utilizando o algoritmo DOS-1 (Chavez et al., 1996), disponibilizado no *plugin* Semi-Automatic Classification (SCP) para QGIS (Congedo, 2016). A partir das imagens obtidas, foram gerados mapas de NDVI nas duas resoluções (10 m e 30 m), considerando a Equação 1.

Os mapas de NDVI obtidos a partir das imagens TERRA/MODIS, Landsat-8/OLI e Sentinel-2A/MSI foram vetorizados e inseridos no Sistema Gerenciador de Bancos de Dados (SGBD) PostgreSQL⁸ com extensão espacial PostGIS⁹. A Figura 5 exibe os mapas nas resoluções de 30 m (Landsat-8/OLI) e 10 m (Sentinel-2A/MSI), respectivamente, classificados em 3 níveis de NDVI considerando quartis com valores baixos (em vermelho), médios (em amarelo) e altos (em verde).

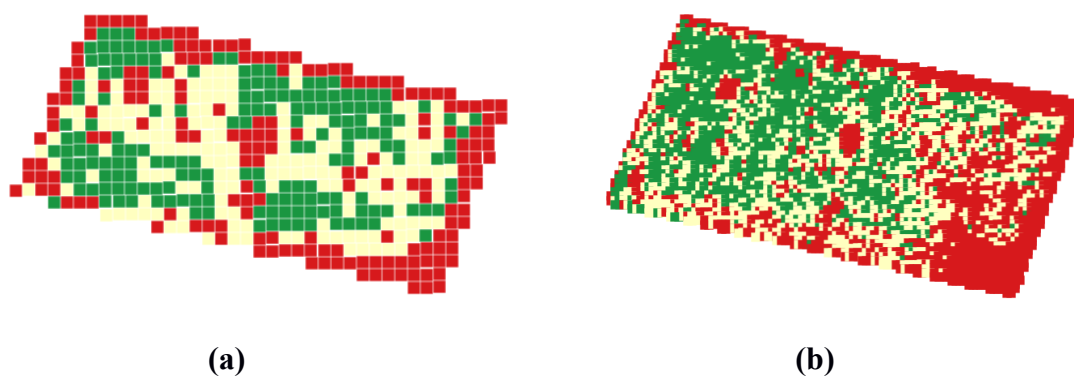


Figura 5 – Mapas de NDVI obtidos a partir das imagens (a) Landsat-8/OLI; e (b) Sentinel-2A/MSI.

O Índice de Moran (MORAN, 1950) é um dos mais utilizados em AP para identificação da correlação espacial entre atributos do solo e da cultura agrícola (Gavioli et al., 2016; Schenatto et al., 2017). Adicionalmente, a extensão espacial PostGIS, disponível no PostgreSQL, permite, a partir de suas funções de correlação e relacionamentos espaciais, simular correlações entre mapas contendo diferentes resoluções, proporcionando resultados similares aos obtidos com o índice de Moran. Neste trabalho, os fatores de ponderação espacial utilizados na composição do coeficiente de correlação são baseados nos relacionamentos espaciais *intersects* e *within* (Engenhofer et al., 1991), considerando-se os polígonos retangulares representativos de cada pixel nas diferentes resoluções espaciais. De acordo com as definições de Engenhofer et al. (1991) e Clementini et al. (1994), um relacionamento do tipo *intersects* entre duas geometrias A e B ocorre se existe ao menos um ponto em comum na composição de ambas; e um relacionamento do tipo *within* ocorre entre essas mesmas geometrias se A é totalmente interna à B. Além disso, para efeito do cálculo da correlação, foram considerados valores de correlação individual entre todos os pixels (*single_corr*); e correlação do valor médio de NDVI ocupado

⁶ Earth Explorer (U.S.Geological Survey): <http://earthexplorer.usgs.gov>

⁷ Copernicus Open Access Hub (European Spatial Agency): <http://scihub.copernicus.eu>

⁸ PostgreSQL: <http://www.postgresql.org>

⁹ PostGIS: <http://postgis.net>

pela área de um pixel de maior resolução espacial, em comparação com o valor do pixel na imagem de menor resolução espacial (*avg_corr*). A Figura 6 mostra um exemplo de *script* SQL gerado para a execução da correlação espacial entre dados dos satélites TERRA/MODIS e Landsat-8/OLI, considerando valores médios dos pixels de uma imagem Landsat-8 cuja área possui um relacionamento do tipo *intersects* com um pixel de uma imagem TERRA/MODIS.

```
select corr(ndvimodis,ndvilandsat) as corrmedia from
(select a.ndvi as ndvimodis, avg(b.ndvi) as ndvilandsat
from "ndvimodis" AS a, "ndviLandsat" AS b WHERE
st_intersects (st_expand(a.geom, 125, 125),st_expand(b.geom,15, 15))
group by a.ndvi order by a.ndvi ) as corrModisLandSat
```

Figura 6 – Exemplo de *script* SQL para correlação espacial.

Scripts SQL como o da Figura 6 fornecem como resultado valores de correlação entre -1 e 1, que devem ser interpretados da seguinte maneira: valores próximos de 1 indicam alta correlação espacial entre o par de variáveis verificadas; valores próximos de -1 indicam alta correlação espacial entre o par de variáveis, em sentidos opostos; e valores próximos de 0 indicam ausência de correlação espacial entre o par de variáveis. No contexto deste trabalho, os pares de variáveis verificados correspondem ao valor de NDVI nas diferentes resoluções espaciais.

4. Resultados e Discussão

A partir dos materiais e métodos descritos na Seção 3, foram realizadas diferentes combinações que permitiram correlacionar espacialmente os mapas de NDVI obtidos das imagens fornecidas pelos satélites TERRA/MODIS, Landsat-8 e Sentinel-2. Inicialmente, foram realizadas correlações considerando o relacionamento espacial *intersects* em áreas ocupadas por pixels localizados em pares de mapas com resoluções espaciais distintas, utilizando correlações do tipo *single_corr* e *avg_corr*. Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Correlação espacial entre mapas de NDVI oriundos de imagens de satélite com diferentes resoluções espaciais utilizando o relacionamento espacial *intersects* e correlações do tipo *single_corr* e *avg_corr*.

Imagem	Imagem Comparação	<i>single_corr</i>	<i>avg_corr</i>
TERRA/MODIS	Landsat-8/OLI	0,206	0,996
	Sentinel-2A/MSI	0,092	0,623
Landsat-8/OLI	Sentinel-2A/MSI	0,358	0,705

A partir dos resultados da Tabela 1, é possível verificar uma maior correlação entre os mapas de NDVI das imagens de satélite TERRA/MODIS com relação as imagens Landsat-8/OLI do que com relação às imagens Sentinel-2A/MSI, com destaque para a alta correlação utilizando valores médios de NDVI presentes nos pixels de maior resolução espacial (*avg_corr*). Esse resultado se explica pela maior proximidade de resolução espacial de imagens TERRA/MODIS (250 m) com relação a imagens Landsat-8/OLI (30 m) do que com relação à imagens Sentinel-2A/MSI (10 m). Além disso, a distribuição da grade de pixels do LandSat-8/OLI é baseada na distribuição do próprio TERRA/MODIS, fazendo com que exista uma tendência de maior correlação entre as imagens geradas por esses satélites. Adicionalmente, a

proximidade na resolução espacial das imagens do Landsat-8/OLI e Sentinel-2A/MSI proporcionou boa correlação espacial entre os mapas de NDVI obtidos, principalmente quando foi utilizada a metodologia *avg_corr*. A metodologia de correlação *single_corr* proporcionou resultados inferiores à metodologia *avg_corr* em todos os casos, principalmente por conta do aumento da heterogeneidade dos dados presentes em um pixel de uma imagem com maior resolução espacial quando comparados com um único valor obtido de uma imagem com menor resolução espacial. Para este estudo, cada pixel de uma imagem TERRA/MODIS intercepta, em média, 70 pixels de uma imagem Landsat-8/OLI; e cada pixel de uma imagem Landsat-8/OLI intercepta, em média, nove pixels de uma imagem Sentinel-2A/MSI.

Em seguida, foram realizadas correlações espaciais considerando o relacionamento espacial *within* em áreas ocupadas por pixels localizados em pares de mapas com resoluções espaciais distintas, utilizando correlações do tipo *single_corr* e *avg_corr*. Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Correlação espacial entre mapas de NDVI oriundos de imagens de satélite com diferentes resoluções espaciais utilizando o relacionamento espacial *within* e correlações do tipo *single_corr* e *avg_corr*.

Imagem	Imagem Comparação	<i>single_corr</i>	<i>avg_corr</i>
TERRA/MODIS	Landsat-8/OLI	0,213	0,845
	Sentinel-2A/MSI	0,091	0,785
Landsat-8/OLI	Sentinel-2A/MSI	0,473	0,747

A partir dos valores exibidos na Tabela 2, é possível observar, de uma maneira geral, um aumento na correlação espacial entre os mapas de NDVI obtidos a partir das imagens Landsat-8/OLI e Sentinel-2A/MSI com relação aos valores da Tabela 1. Este resultado mostra que o relacionamento espacial *within* pode ser uma opção mais justa para correlacionar dados em diferentes resoluções espaciais, pois os pixels espacialmente correlacionados nas diferentes resoluções tendem a fornecer valores de NDVI mais próximos. Quando o relacionamento *intersects* é utilizado, aumenta muito a possibilidade de serem selecionados pixels com interseções muito pequenas em uma imagem com alta resolução espacial com relação à pixels de uma imagem com resolução espacial menor.

Em geral, a partir dos experimentos descritos nesta seção, foi possível observar que mapas de NDVI obtidos a partir de imagens de qualquer um dos três satélites estudados podem ser utilizados para identificar a variabilidade espacial interna à um talhão agrícola de aproximadamente 50 ha, dependendo do nível de detalhe desejado. Entretanto, para aplicações em AP, onde normalmente são utilizadas grades de alta resolução espacial (em torno de 5 m), a área ocupada por cada pixel TERRA/MODIS de 6,25 ha faz com que praticamente não exista dependência espacial entre pares de pixels, dificultando a obtenção de bons resultados a partir de algoritmos geoestatísticos de interpolação espacial.

Especificamente para o talhão utilizado neste trabalho, que é predominantemente plano, a dependência espacial é em geral muito distante, justificando o uso de imagens de satélite de alta resolução para identificação da variabilidade espacial. Desse modo, os mapas de NDVI obtidos tanto a partir das imagens Landsat-8/OLI quanto Sentinel-2A/MSI, em um nível maior de detalhes, permitem a identificação de “manchas” na biomassa da cultura agrícola que podem indicar diferenças nos valores de produtividade após a colheita. A existência de um bom nível de correlação espacial entre esses mapas permite a utilização de ambos como indicativos confiáveis para a execução de intervenções dentro do ciclo da AP, como aplicações de insumos e corretivos à taxa variada. A escolha do uso de imagens de um ou outro sensor pode ser

realizada a partir da necessidade de maior ou menor detalhamento espacial da operação a ser realizada, ou até mesmo a partir da disponibilidade das imagens, preferencialmente com qualidade radiométrica e sem cobertura de nuvens nas datas desejadas.

5. Conclusões e Sugestões

Este trabalho descreveu um experimento para verificação de correlação espacial existente entre mapas de NDVI obtidos a partir de imagens TERRA/MODIS, Landsat-8/OLI e Sentinel-2A/MSI. Os resultados obtidos mostraram que a correlação espacial entre os mapas gerados a partir das imagens TERRA/MODIS, com resolução espacial de 250 m, é em geral maior com relação aos mapas gerados a partir de imagens Landsat-8/OLI (com resolução espacial de 30 m) do que com relação àqueles gerados a partir de imagens Sentinel-2A/MSI (com resolução espacial de 10 m). Independentemente disso, praticamente não existe dependência espacial entre pixels internos a uma área agrícola de 50 ha considerando imagens com baixas resoluções espaciais, como a disponibilizada pelo TERRA/MODIS, dificultando a transformação da grade amostral em resoluções espaciais desejáveis para aplicações em AP. Por outro lado, a série temporal extensa, consistente e de qualidade fornecida pelo satélite TERRA/MODIS auxilia na verificação da dinâmica de produção de uma área agrícola ao longo dos anos e, conseqüentemente, da sua aptidão para que seja gerida considerando os conceitos de AP. Já os mapas de NDVI obtidos a partir das imagens Landsat-8/OLI e Sentinel-2A/MSI permitem identificar possíveis variações na biomassa vegetal que, aliados a atributos meteorológicos, podem se tornar indicativos para valores espacialmente diferenciados de produtividade da área. Esses mapas podem servir, por exemplo, como indicadores para a construção de mapas de aplicação de insumos e corretivos agrícolas no próximo ciclo de produção da área, uma vez que nem sempre os produtores possuem colhedoras automatizadas capazes de gerar mapas de produtividade de boa qualidade.

Como trabalho futuro, pretende-se realizar correlações espaciais entre os mapas de NDVI, obtidos a partir das imagens Landsat-8/OLI e Sentinel-2A/MSI, com mapas obtidos a partir de imagens com resolução espacial de poucos centímetros geradas por câmeras multiespectrais a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs); e sensores de campo que consideram, por exemplo, a refletância do dossel das plantas e a condutividade elétrica do solo. A análise da variabilidade espacial da lavoura considerando dados de qualidade e com alta resolução espacial, considerando diferentes atributos do solo e das plantas, pode permitir a realização de intervenções cada vez mais precisas e com erro reduzido.

6. Agradecimentos

Agradecemos à equipe do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMAmt), responsável pela gestão da área da Fazenda Farroupilha onde são realizados experimentos de AP, pelas informações fornecidas a respeito da localização espacial e histórico de produção.

7. Referências

Antunes, J. F. G.; Lampareli, R.A.C; Rodrigues, L. H. A. Avaliação da dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de perfis temporais de dados MODIS. **ENG AGR-JABOTICABAL**, v. 35, p. 1127-1136, 2015.

Chavez, P.S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 62, n. 9, p. 1025-1035, 1996.

Congedo, L. Semi-automatic classification plugin documentation. **Release**, v. 4, n. 0.1, p. 29, 2016.

- Clementini, E.; Sharma, J.; Egenhofer, Max J. Modelling topological spatial relations: Strategies for query processing. **Computers & Graphics**, v. 18, n. 6, p. 815-822, 1994.
- Egenhofer, Max J.; Franzosa, Robert D. Point-set topological spatial relations. **International Journal of Geographical Information System**, v. 5, n. 2, p. 161-174, 1991.
- Esquerdo, J. C. D. M.; Coutinho, A. C.; Antunes, J. F. G. Sistema on-line para visualização de perfis temporais de índices vegetativos de imagens MODIS. In: XVIII Brazilian Symposium on GeoInformatics, 2017, Salvador-BA. **Anais...** São José dos Campos-SP: INPE, 2017. p. 207-209.
- Gavioli, A.; Souza, E.G.; Bazzi, C.L.; Guedes, L.P.C.; Schenatto, K. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 302-310, 2016.
- George, L.A. de C.; Inamasu, Ricardo Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão: Bernardi, A. C. de C.; Naime, J. de M.; Resende, A. V. de; Bassoi, L. H.; Inamasu, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134.
- Inamasu, R. Y.; Souza, R.D.; Porto, A.J.V.; Fortes, C.; Luchiari Junior, A.; Schepers, J.S.; Shanahan, J.F.; Francis, D.D. Active sensor readings for assessing sugarcane crop canopy chlorophyll status. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 8., 2006, Minneapolis, Minnesota, USA. **Conference abstracts**. Minneapolis, Minnesota, USA:[Slp], 2006.
- Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Myers, D. B.; Drummond, S. T.; Hong, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, n. 1-3, p. 285-308, 2005.
- Liakos, V.; Tagarakis, A.; Fountas, S.; Nanos, G.D.; Tsiropoulos, Z.; Gemtos, T. Use of NDVI to predict yield variability in a commercial apple orchard. In: **Precision agriculture'15**. Wageningen Academic Publishers, 2015. p. 188-197.
- Milne, A. E.; Webster, R.; Ginsburg, D.; Kindred, D. Spatial multivariate classification of an arable field into compact management zones based on past crop yields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.80, p.17-30, 2012.
- Mourtzinis, S.; Rowntree, S.C.; Suhre, J.J.; Weidenbenner, N.H.; Wilson, E.W.; Davis, V.M.; Naeve, S.L.; Casteel, S.N.; Diers, B.W.; Esker, P.D.; Specht, J.E. The use of reflectance data for in-season soybean yield prediction. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 4, p. 1159-1168, 2014.
- Moran, P.A.P. Notes on continuous stochastic phenomena. **Biometrika**, v. 37, n. 1/2, p. 17-23, 1950.
- Muzuku, M.; Khosla, R.; Reich, R.; Inman, D.; Smith, F.; & MacDonald, L. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n.5, p. 1572-1579, 2005.
- Pantazi, X.E.; Moshou, D.; Alexandridis, T.; Whetton, R.L.; Mouazen, A.M. Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 57-65, 2016.
- 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., **Proceedings...** Washington, D. C.: NASA, v. 1, p. 309-317, 1973.
- Schenatto, K.; de Souza, E.G.; Bazzi, C.L.; Gavioli, A.; Betzek, N.M; Beneduzzi, H.M. Normalization of data for delineating management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 238-248, 2017.
- Solari, F.; Shanahan, J.; Ferguson, R.; Schepers, J.; Gitelson, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 571-579, 2008.
- Tagarakis, A.; Liakos, V.; Fountas, S.; Koundouras, S.; Gemtos, T.A. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 18-39, 2013.
- Vaz, C. M. P.; Hopmans, Jan W. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 1, p. 4-12, 2001.
- Zhang, X.; Zhang, Q. Monitoring interannual variation in global crop yield using long-term AVHRR and MODIS observations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 191-205, 2016.