



**Ziany Neiva
Brandão**
Embrapa Algodão



**Álvaro Vilela
Resende**
Embrapa Milho e
Sorgo



**Célia Regina
Grego**
Embrapa Informáti-
ca Agropecuária



**Eduardo
Antonio
Speranza**
Embrapa Informáti-
ca Agropecuária

Agricultura de precisão: tecnologias para o algodoeiro

O Brasil consolidou-se como referência na produção agropecuária no cinturão tropical e, atualmente, é um dos principais provedores de alimentos, madeira e fibras em âmbito global. Se por um lado há evidentes vantagens para a balança comercial brasileira com a expansão do mercado consumidor, por outro, nossos produtores hoje têm uma clientela cada vez mais exigente, disputada também pelos grandes *players* estrangeiros.

Nesse cenário, sobretudo na cadeia do algodão, ser um produtor competitivo é uma necessidade vital; é preciso estar em dia com a adoção das tecnologias mais recentes que promovam ganhos de eficiência associada à qualidade e à sustentabilidade do processo produtivo. Os dispositivos e as tecnologias de agricultura de precisão (AP) evoluem constantemente, bem como a gama de suas aplicações na rotina das fazendas. Ao menos em operações pontuais, a AP já é uma realidade no dia a dia dos produtores de algodão, mas o potencial de ampliação de seu uso é enorme; chegará um momento em que a maioria dos processos de planejamento e decisão será integrada por meio de ferramentas inteligentes, alimentadas por dados especializados de monitoramento dos ambientes de produção e do clima, além de registros sobre o desenvolvimento e o desempenho das lavouras.

Embora em muitos casos ainda sejam necessárias validações e ajustes adaptativos, de acordo com as necessidades e as características dos sistemas de produção e das propriedades agrícolas, diversas técnicas relacionadas à AP já tiveram seu valor provado, a exemplo da otimização operacional e da racionalização

no uso de insumos, com claros reflexos na rentabilidade. Dessa forma, para permanecerem no ramo, mesmo que involuntariamente, os produtores precisarão aderir a estratégias gerenciais baseadas em múltiplas fontes de informações, integradas pelo aparato de AP.

1. Uso de tecnologias sítio-específicas na cultura do algodão

A agricultura convencional trata todo o campo de maneira uniforme em relação a manejo do solo, aplicação de fertilizantes, pesticidas e outros insumos. No entanto, a produtividade agrícola é afetada pela heterogeneidade espacial e temporal de diversos fatores, como topografia (relevo, declividade), solo (composição química e física), compactação (por conta do manejo), ocorrência de agentes biológicos (doenças, pragas) e fatores meteorológicos (umidade, chuva, temperatura, velocidade do vento etc.). Assim, o tratamento homogêneo fornecido pela agricultura convencional pode ter impacto econômico negativo ao restringir o potencial produtivo de determinadas partes da lavoura (Resende *et al.*, 2019).

A agricultura de precisão é um termo genérico para estratégias de gestão que, com o uso de tecnologias e técnicas, analisam dados temporais e espaciais, associando informações preexistentes, objetivando o suporte técnico às decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada, para melhorar a eficiência do uso dos recursos e a produtividade das culturas. Para o tratamento da variabilidade apresentada no campo, são usados conhecimentos aprofundados das características desejadas dentro de cada lavoura ou ambiente de produção.

Esses parâmetros podem incluir tipo de solo, textura, pH, matéria orgânica, teores de nutrientes, topografia, disponibilidade de água, plantas daninhas, pragas, doenças, condições climáticas etc. O objetivo da implantação de um plano de manejo na AP é abordar toda essa variabilidade e assim melhorar a eficiência e a rentabilidade da produção agrícola.

Atualmente, a cultura do algodoeiro em larga escala no Brasil é explorada em regiões produtoras de culturas anuais no bioma Cerrado, com lavouras conduzidas em talhões de grandes dimensões. Módulos de dezenas ou centenas de hectares certamente apresentam variações produtivas decorrentes dos fatores já citados e suas interações, mas um manejo diferenciado, que leve em conta a variabilidade espacial dentro dos talhões, não era possível nessa escala de cultivo antes do advento da AP.

Locais com características similares determinam sub-regiões para aplicação de manejo localizado ou sítio-específico. Entretanto, apesar de o manejo sítio-específico das lavouras apresentar oportunidades para melhoria da produtividade e qualidade ambiental, a mensuração dos benefícios é complexa, especialmente quando o produtor está iniciando o aprendizado das técnicas da AP e ainda precisa investir em *softwares*, equipamentos e sensores.

2. Importância da escolha dos sensores para a AP

A aplicação de tecnologias de AP baseadas em sensores requer maior capacidade técnica para processamento e análise dos dados de sensoramento, sendo sua adoção recomendável quando a fazenda já acumula certa experiência em AP.

No reconhecimento da área a ser trabalhada, deve-se considerar uma amostragem inteligente, na qual são avaliadas as similaridades das características locais em uma lavoura (Brandão *et al.*, 2017). Para isso podem ser usados não só o histórico da área, mas também imagens aéreas, topografia, mapas de produtividade e de condutividade elétrica, além de dados de fertilidade. Esses dados organizados possibilitarão a criação de zonas de manejo refinadas e a definição dos sensores que deverão monitorar e atuar na cultura durante seu ciclo, permitindo tomar decisões com mais segurança ao longo do tempo.

Os sensores podem ser escolhidos de acordo com a época em que se deseja o monitoramento. A escolha pelo produtor de sensores para o diagnóstico do solo, ou para o acompanhamento da cultura, vai depender das fontes de variabilidade encontradas no histórico da área.

Os sensores podem ser divididos em três tipos: os de solo, os de plantas e os de produtos. Há duas formas de sensoriamento, que são com e sem contato direto com o objeto que se quer monitorar (planta, solo etc.). A tendência é que se conjugue o uso de diferentes sensores para a obtenção de informações mais consistentes, visando subsidiar mais efetivamente as decisões gerenciais.

Dos sensores existentes para as mais diversas aplicações na agricultura, alguns vêm sendo experimentados por agricultores brasileiros, e seu uso tende a tornar-se rotineiro a partir da redução do custo de aquisição e com a validação para as condições locais.

2.1 Sensores para o monitoramento do solo

A AP agrega informações de variabilidade e possibilita encontrar respostas para os fatores que estão influenciando a produtividade, utilizando sistemas georreferenciados que possibilitam a criação de zonas de manejo. Sensores de solo oferecem medições em tempo real, reduzindo as cansativas e caras amostragens de solo, minimizando os custos com manuseio, transporte e armazenagem de amostras (Brandão *et al.*, 2018). Dessa forma, é possível estabelecer procedimentos diferenciados para cada área na lavoura.

Atualmente, alguns sensores de solo são utilizados por cotonicultores, destacando-se aqueles que fornecem dados correlacionados a textura, umidade, pH, matéria orgânica e disponibilidade de alguns nutrientes. Dentre esses estão os sensores combinados, ou seja, que permitem obter registro de mais de um atributo simultaneamente. Além disso, com a popularização do GPS, esses dados são georreferenciados e apresentados em tempo real, propiciando ao final um mapa completo das características avaliadas.

Dentre os mais utilizados encontram-se os sensores de contato direto e os de condutividade elétrica aparente do solo (CEa), de matéria orgânica e de pH. Um dos sensores de CEa mais frequentes é mostrado na *Figura 1*.

A Veris Technology fabrica um sensor de condutividade elétrica cujos eletrodos estão diretamente em contato com o solo, como mostrado na *Figura 1*. Há vários modelos disponíveis que fornecem medições de condutividade elétrica em uma ou duas profundidades diferentes. Geralmente, esses sensores fazem contato com o solo por meio de dois

a três pares de discos (*Figura 1A*), em que um deles fornece corrente elétrica para o solo, enquanto os outros medem a queda de tensão entre eles, usando essa diferença para calcular a condutividade elétrica (*Figura 1B*). Sensores de contato como o Veris medem condutividade elétrica do solo em duas profundidades diferentes: rasa (30 cm) e profunda (90 cm).

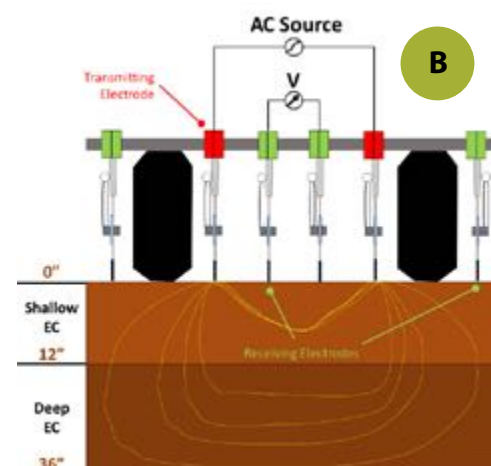


Figura 1. Sensores de solo e com contato direto. (A) Sensor de condutividade elétrica 3150 - ©Veris Technology (Veris, 2019). (B) Esquema básico mostrando o circuito elétrico em um equipamento de medição da CEa

Há também sensores de condutividade elétrica que não fazem contato com o solo, como mostrado na *Figura 2*; esses sensores trabalham com o princípio de indução eletromagnética (EMI), que se baseia na medição da variação de impedância mútua entre um par de bobinas acima da superfície do solo.

A maioria dos instrumentos de indução eletromagnética é composta por dois ou mais conjuntos de bobinas, que são conectadas eletricamente e separadas por uma distância fixa. A bobina do transmissor (campo primário) é usada para gerar um campo

eletromagnético em uma frequência específica, o que faz com que a corrente elétrica flua em materiais condutores no solo. O fluxo de correntes no solo, chamadas de correntes parasitas, geram um campo magnético, que é detectado pela bobina receptora. A magnitude do campo secundário sentido pelo receptor depende do tipo e da distribuição do material condutor presente no solo.

Empresas como *Geophex Ltd.*, *Geonics*, *Aeroquest Sensor Technologies Ltd.*, e *Geophysical Survey Instrumentations* oferecem vários modelos de sensores de CEa por indução eletromagnética.



Figura 2. (A) Sensor de indução eletromagnética EM38 da *Geonics* instalado em um veículo de PVC para medição da condutividade elétrica aparente do solo (CEa); (B) carro de transporte com sensor GEM-3 da *Geophex* em plataforma de PVC, transmissores, receptores e GPS e (C) mapa de dados obtidos através do sensor EMI

Sensores de condutividade elétrica sem contato geralmente oferecem maior profundidade de medição do que sensores de contato direto. Na AP, as medições de condutividade elétrica por indução são usadas para criar conjuntos de dados espacialmente densos para descrever variabilidade do solo dentro de um campo de forma eficiente e a baixo custo, estando bem correlacionadas com o pH do solo. Um sensor de EMI acoplado a um receptor de GPS normalmente pode gerar em torno de 120 registros de condutividade a cada hectare, quando puxado em velocidade aproximada de 16 km/h e usando espaçamento de aproximadamente 17 m entre passagens. Esse é um conjunto de dados muito mais denso que o da grade de amostragem do solo (que no Brasil varia de 1 ha a 5 ha, quando realizada em condições de campo). Com um sensor EMI é possível produzir um mapa de solo de maior resolução do que a apresentada em um mapa de nutrientes típico.

As profundidades de exploração em sensores EMI dependem do modelo escolhido; para uso em agricultura, geralmente os modelos fornecem profundidades efetivas até 1,5 m, como é o caso do EM38-MK2 (*Figura 2A*), podendo-se escolher entre dois conjuntos de profundidades, que são com bobinas receptoras, separadas por 1 m e 0,5 m do transmissor, fornecendo dados de profundidades efetivas de 1,5 m e 0,75 m, respectivamente, quando posicionadas na orientação vertical do dipolo, e 0,75 m e 0,375 m, respectivamente, quando na orientação do dipolo horizontal.

Amostragem do solo na AP para aplicações de corretivos e fertilizantes a taxa variável

Em geral têm-se coletado amostras georreferenciadas dispostas em grade amostral (*grid*), com tamanho de quadrículas variando entre 2 ha e 10 ha (Resende *et al.*, 2019), com crescente conscientização de que quadrículas maiores que 3 ha são pouco efetivas para fins de agricultura de precisão. Os resultados das análises em laboratório são processados por meio de programas de geoestatística e geoprocessamento, que elaboram mapas interpolados representando a variação espacial nos valores de cada atributo analisado. De posse dos mapas de determinados atributos (fósforo, potássio e saturação por bases, por exemplo), são gerados mapas de prescrição de fornecimento de fertilizantes e de calcário, de acordo com a mudança na condição de fertilidade de um local para outro dentro do talhão; existe maquinário capaz de variar, automaticamente, a aplicação desses insumos no campo em conformidade com os mapas de prescrição. O conjunto dessas etapas é designado pelo termo em inglês *variable rate technology* (VRT), que pode ser traduzido como “tecnologia de adubação a taxa variável”.

A etapa de amostragem de solo para AP é passível de críticas porque nem sempre oferece resolução satisfatória, podendo acarretar falhas no mapeamento de atributos de solo e levar a tomadas de decisão equivocadas ou pouco efetivas para o refinamento que se busca com o manejo sítio-específico. O usuário deve definir o esquema de amostragem com

custos viáveis, mas sem prejuízo dos critérios técnicos, uma vez que os procedimentos utilizados afetam as etapas posteriores de processamento dos dados por geoestatística e SIG, podendo implicar em erros de interpretação, culminando com manejo inadequado da lavoura e insucesso no uso da AP.

Trabalhos realizados em solos brasileiros (Barbieri *et al.*, 2008; Cherubin *et al.*, 2014; Cora & Beraldo, 2006; Gimenez & Zancanaro, 2012; Machado *et al.*, 2004; Montanari *et al.*, 2008; Resende *et al.*, 2006) comprovam a dificuldade de garantir a confiabilidade em diagnósticos espacializados da fertilidade química. Há necessidade de grades amostrais relativamente densas, em muitos casos com mais de uma amostra por hectare, totalizando um grande número de amostras a ser analisado para que se possa captar a variabilidade real do solo nas lavouras (Coelho, 2003; Machado *et al.*, 2004, Resende *et al.*, 2006). Desse modo, a quantidade de amostras ideal sob o aspecto geoestatístico geralmente é inviável na prática da AP nas fazendas. Como

medida para baixar custos, é comum o uso de amostragens de baixa densidade.

Na região dos Campos Gerais do Paraná, Machado *et al.* (2004) estudaram uma área de 13 hectares em Latossolo Vermelho distroférico, concluindo que seria necessária a coleta de catorze amostras por hectare, a fim de representar a variabilidade dos atributos do solo naquele talhão. Resende *et al.* (2006) avaliaram amostragens em grades com tamanho de quadrícula variando de 0,25 a 9,0 hectares em lavoura no cerrado do entorno do DF, obtendo dependência espacial para os principais atributos de fertilidade em quadrículas de até 2,25 ha, exceto para o fósforo, que só apresentou dependência espacial na amostragem mais densa, com tamanho de quadrícula de 0,25 ha. Em geral, atributos como textura, matéria orgânica, pH, K, Ca e Mg tendem a apresentar gradiente de variação com maior continuidade espacial, ao passo que P e micronutrientes expressam alta variabilidade espacial a curta distância (Amado *et al.*, 2009; Resende *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2001 Montezano *et al.*, 2006).

Quando são comparados diferentes grids para amostragem de um talhão, mesmo quando se encontra dependência espacial na análise dos dados, os mapas diagnósticos obtidos podem expressar conformações de áreas muito diferentes de disponibilidade de um dado nutriente (Figura 3), o que implicaria em divergências entre os respectivos mapas de prescrição para a adubação a taxa variável.

Resende *et al.* (2019) consideram que o monitoramento do comportamento espacial por meio da geoestatística constitui uma abordagem mais eficiente para atributos cuja variabilidade deriva de processos naturais associados às características de formação do solo e que tendem a permanecer estáveis ao longo do tempo, como, por exemplo, a textura e a mineralogia. No caso de atributos

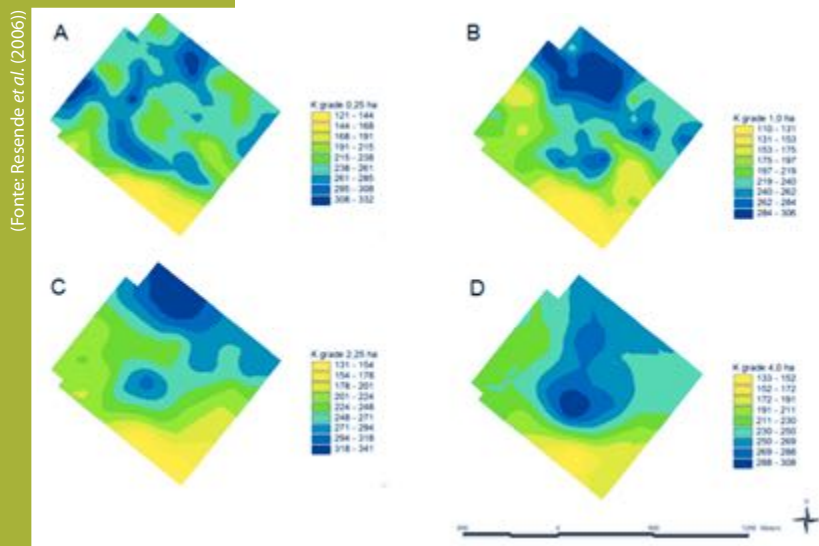


Figura 3. Teores de potássio (K, em mg dm^{-3}) no solo obtidos a partir de amostragens em grades com células de 0,25 ha (A); 1,0 ha (B); 2,25 ha (C); e 4,0 ha (D), que resultam em diferentes conformações das zonas de alta e de baixa disponibilidade do nutriente

(Fonte: Resende *et al.*, (2006))

químicos, ocorrem oscilações espaciais e temporais causadas pelo próprio uso agrícola do solo, adubações e manejo geral das culturas, gerando variabilidades aleatórias e de baixa continuidade espacial, levando periodicamente a alterações nas zonas de manejo. Portanto, o manejo na AP deve ter uma perspectiva de ajustes contínuos ao longo do tempo, utilizando-se toda ferramenta que agregue informações sobre a variabilidade espacial e temporal do talhão como mapas de produtividade, imagens aéreas, amostragens periódicas de solo etc. (Resende *et al.*, 2019).

Falhas operacionais nas aplicações a taxa variável frequentemente passam despercebidas por técnicos e produtores, sendo necessárias aferições constantes nas regulagens em condições de campo para diferentes doses e produtos que se deseja aplicar. Também devem ser observadas as limitações de alguns equipamentos quanto às defasagens de tempo de resposta na mudança de doses, para mais ou para menos, durante as aplicações a taxa variável (Resende *et al.*, 2019). Processos de segregação por tamanho e densidade de partículas dificultam a obtenção de uniformidade nas aplicações a lanço de corretivos e fertilizantes, em especial de adubos NPK do tipo mistura de grânulos (Fulton *et al.*, 2013). Em conclusão, por mais que se busquem homogeneidade e estabilidade das condições de fertilidade do solo por meio da AP ainda existirão variações involuntárias induzidas pela atividade humana, ou pelo próprio maquinário nos ambientes de produção agrícola.

Um maior detalhamento sobre os diversos aspectos envolvidos na amostragem de solo para fins de manejo da fertilidade por agricultura de precisão, bem como sugestões de procedimentos e cuidados operacionais, estão em publicação de Resende & Coelho (2017).

2.2 Sensores para monitoramento das plantas

Uma das principais diferenças entre o algodão e outras *commodities* é que não basta apenas produzir em grande quantidade, mas é preciso otimizar a qualidade da fibra, observando o equilíbrio entre micronaire, resistência, comprimento e maturidade, pois o mercado têxtil é muito exigente.

Para isso, as condições nutricionais, o controle de pragas e doenças e o fornecimento de água adequado devem ser monitorados

durante todo o ciclo produtivo. Se as condições são muito favoráveis, o algodoeiro prioriza o crescimento vegetativo em detrimento do reprodutivo, e, nesse caso, é necessário também estabelecer os limites de correções e/ou suplementações aplicadas para o controle do crescimento excessivo da planta, observando-se a manutenção das estruturas reprodutivas.

Jorge & Inamasu (2014) mencionam possibilidades de uso de diferentes sensores embarcados em máquinas e implementos; tais sensores, como sensores ativos de dossel (para detecção de refletância do dossel e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI), câmeras multiespectrais (detecção de estresse nutricional, índices fisiológicos e estrutura da copa), câmeras termais (para estresse hídrico e uniformidade de irrigação) ou câmeras RGB já estão hoje sendo vendidos separadamente ou a bordo de veículos aéreos não tripulados (VANTs), ou mesmo em plataformas compostas instaladas em máquinas agrícolas (*Figura 4D*).

Sensores de dossel funcionam baseados na espectroscopia de refletância, ou seja, em medidas da reflexão da radiação eletromagnética após interação com diferentes superfícies, considerando comprimentos de onda preestabelecidos, oriundos do chamado espectro refletido, na região do visível (VIS – 0,4-0,7 μm), infravermelho próximo (NIR – 0,7-1,3 μm) e infravermelho de ondas curtas (SWIR – *short wave infrared* – 1,3-2,5 μm) (Shiratsuchi *et al.*, 2014). Segundo esses autores, sensores que trabalham em diferentes comprimentos de onda podem ser acoplados aos VANTs, criando um enorme leque de possibilidades de aplicação na agricultura, como, por exemplo, captar imagens no espectro visível para quantificação da biomassa, no infravermelho para detecção de estresses nutricionais, na faixa termal para evidenciar estresses hídricos, além de imagens hiperespectrais para identificar coberturas vegetais, presença de doenças e muitas outras características das plantas.

De acordo com Brandão *et al.* (2014), vários avanços estão sendo obtidos para detecção e correção de deficiências nutricionais durante o ciclo de desenvolvimento do algodoeiro, mas sua implantação no campo ainda carece de dados de calibração para as condições do Brasil. Nas culturas de trigo, milho, algodão e cana-de-açúcar,

sensores estão sendo validados buscando ganhos de eficiência no manejo da adubação nitrogenada de cobertura. Existe uma gama de sensores para avaliação em plantas, sendo comuns os manuais (Figuras 4A e 4B) e os

embarcados em tratores (Figura 4D). Um dos desafios tecnológicos a serem superados refere-se ao desenvolvimento de algoritmos de calibração dos equipamentos para utilização em diferentes culturas e sistemas de produção.



(Imagens: Álvaro Resende, Ziany Neiva, e Taylor e Fulton, 2010)

Figura 4. Equipamentos com sensores para o manejo de nitrogênio. (A) Clorofilômetros SPAD® e Falker; (B) Sensor ativo de dossel Green Seeker® no milho; (C) Vant com câmera RGB no algodoeiro, em Cristalina - GO, e (D) Sensor Green Seeker® montado em pulverizador para VRT baseada em NDVI

Para monitoramento da vegetação podem ser usados sensores de contato direto, como os clorofilômetros, que servem para estimar os teores relativos de clorofila (Figura 4A) e cujos

valores são associados diretamente aos teores foliares de nitrogênio (N). Brandão *et al.* (2012), avaliaram que medições realizadas com o clorofilômetro SPAD (Figura 4A) apresentam

correlação acima de 80% com os teores foliares de N obtidos no algodoeiro irrigado.

Apesar do bom desempenho na estimativa dos teores de N, os clorofilômetros portáteis manuais podem ser úteis em avaliações localizadas, mas são operacionalmente pouco viáveis em áreas extensas, comuns na região do Cerrado. Para avaliações em grandes áreas, usando o mesmo princípio de funcionamento, já se encontram disponíveis

sensores acoplados a equipamentos que permitem estimar os teores foliares de N e dosar a quantidade de fertilizante nitrogenado para a aplicação a taxa variada em tempo real. Esses equipamentos não operam por contato direto com as plantas; registram dados ao medirem quanto da luz emitida pelos sensores as plantas refletem. São chamados sensores remotos de campo ou sensores proximais (*Figura 5*).

(Imagens: Trimble, 2018)



Figura 5. Sistema composto da Trimble usando os sensores GreenSeeker® e OptRx®

Sensores remotos orbitais (a bordo de satélites) ou sensores usados em imagens aéreas, como a câmera multiespectral, termal e RGB de alta resolução da Micasense® (*Figura 6A*), possuem em comum o princípio de imageamento por faixas. A largura das faixas e a precisão dos dados dependem do tipo de sensor, altitude ou órbita. Enquanto imagens

aéreas podem oferecer uma melhor resolução apresentando diferentes tons, o que possibilita uma classificação subjetiva do dossel de plantas da lavoura (*Figura 6B*), elas dependem de processamento posterior à coleta dos dados para formação de uma única imagem e remoção dos erros ocasionados pelo posicionamento da aeronave.

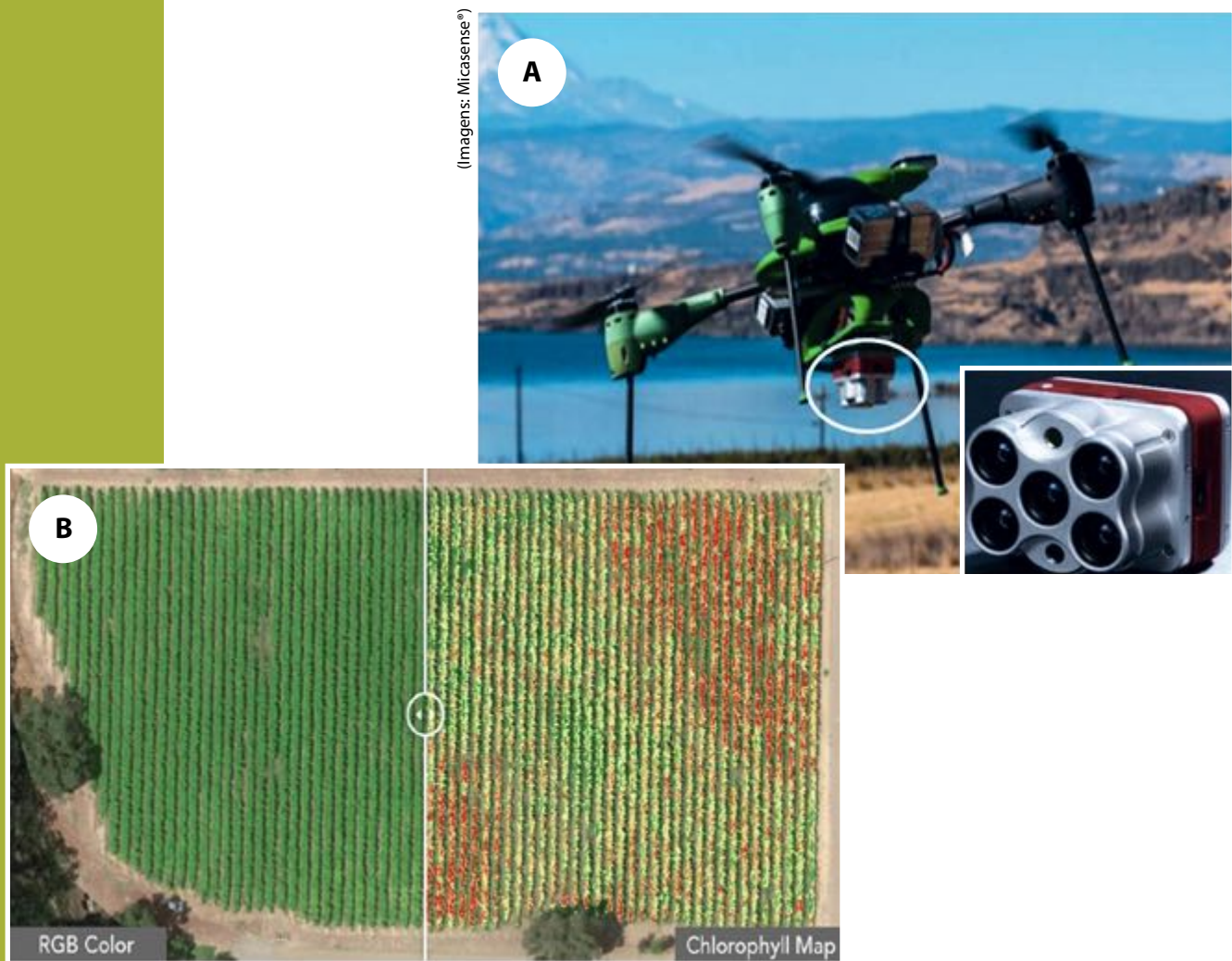


Figura 6. Sensores remotos para vegetação. (A) Câmera termal, multiespectral e RGB de alta resolução da Micasense®, instalada em VANT comercial para monitoramento de culturas. (B) Imagem aérea obtida com câmera Altum da Micasense®, instalada em VANT, mostrando a imagem RGB de alta resolução e sua classificação em quatro classes distintas em mapa de estimativa da clorofila na mesma área

Já as imagens orbitais podem oferecer desde a temperatura do terreno até valores da luz refletida pelas plantas, exatamente como os sensores usados em solo, mas tendo como vantagem as largas faixas imageadas, embora, algumas vezes, o excesso de nuvens possa impossibilitar a extração de dados em datas essenciais para a suplementação nutricional ou hídrica adequada em culturas agrícolas. Por sua vez, os radares, apesar de mais caros, fazem o imageamento da área sem problemas de interferência

de nuvens, dependendo de mão de obra especializada para a correta interpretação dos dados.

A decisão sobre qual sensor usar dependerá do estágio de adoção da AP em que o agricultor se encontra. No Brasil, muitos produtores de algodão já iniciaram seus processos de gerenciamento da lavoura utilizando técnicas de agricultura de precisão. Em média, são registrados de 20% a 25% de economia em insumos após o início do processo de AP, quando em comparação às lavouras que usam o

manejo convencional. Com as safras seguintes, a tendência é a redução dessa diferença inicial à medida que as correções vão sendo feitas, e as áreas de cultivo tendem a tornar-se mais homogêneas.

2.3 Sensores de produtividade e mapas de rendimento

Os mapas de produtividade possibilitam a identificação da variabilidade de um talhão que não seria detectada pelo mapeamento de outras variáveis isoladas. Assim, subáreas com rendimentos contrastantes, que permanecem visíveis mesmo com rotação de culturas na área, devem receber maior atenção para diagnósticos direcionados e manejo sítio-específico das causas da variabilidade. Sem dúvida, o mapeamento das colheitas é uma etapa crucial para se avançar no gerenciamento das propriedades baseado na AP (Louhaichi *et al.*, 2013; Santi *et al.*, 2009). Não obstante, mesmo quando dispõe de colhedoras equipadas com sensores, a maioria dos produtores ainda não reconhece o real valor dos mapas de produtividade.

A avaliação da produtividade das culturas ao final de seu ciclo fornece um dado real que permite a criação de zonas de manejo (ZM) daquela lavoura a partir de históricos da produtividade combinados com dados de atributos do solo, explicando a maior parte da variabilidade e suas causas (Brandão *et al.*, 2018).

A geração dos mapas de produtividade só é possível se a colhedora estiver equipada com sensor de rendimento, sistema de posicionamento global (GPS) e um dispositivo para o armazenamento dos dados de produtividade que vêm associados a suas coordenadas geográficas, como o kit apresentado na *Figura 7*.

Para o algodão, a produtividade é medida por sensores de fluxo de massa que são instalados e conectados aos dutos de entrada de pluma e caroço de algodão na máquina e medem a quantidade que por ali passa (John Deere, 2006), como apresentado na *Figura 7*. Os dados de produtividade devem ser submetidos à limpeza para retirada de erros, seguido pelo processo de filtragem dos dados brutos, permitindo assim a obtenção de resultados mais coerentes e o aumento da qualidade final das informações (Molin *et al.*, 2015).

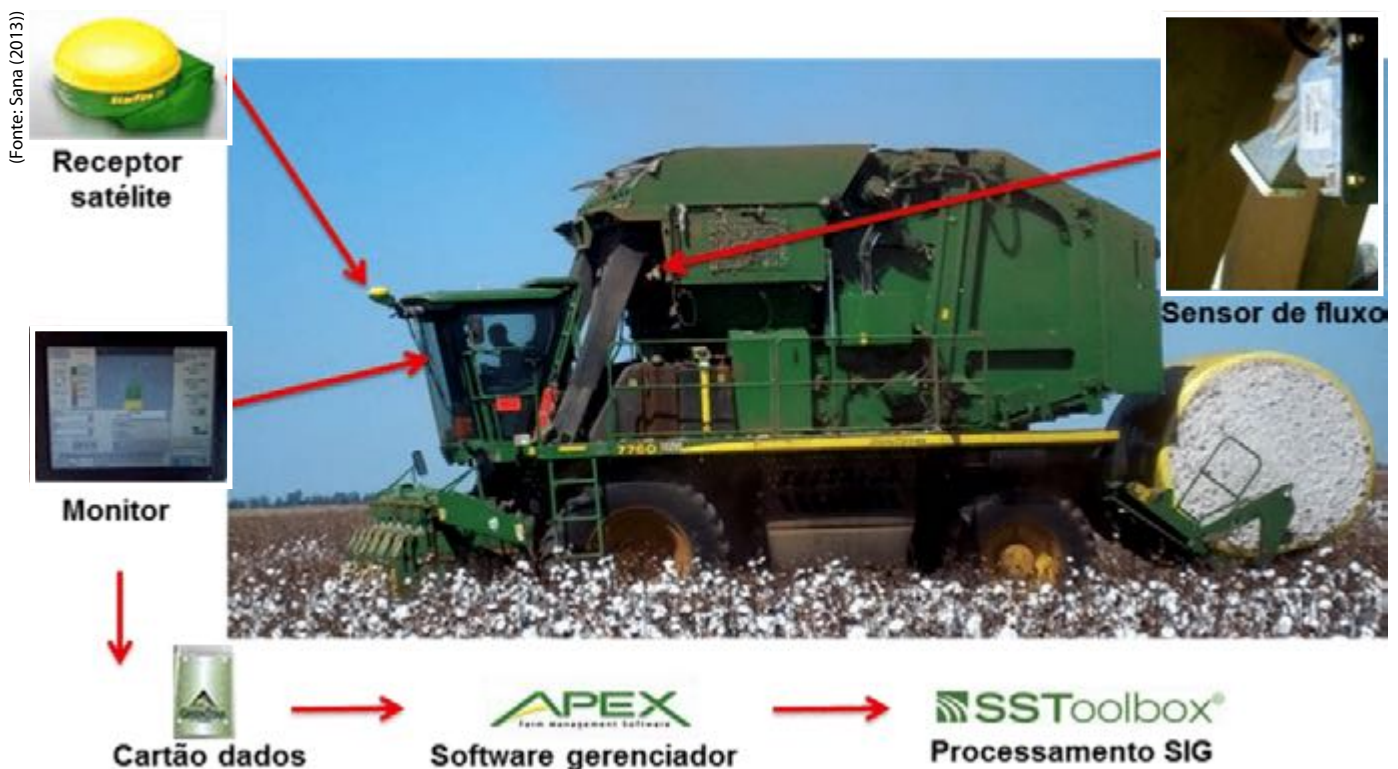


Figura 7. Processo para geração mapas de produtividade na cultura do algodão

Tem-se encontrado variação da produtividade das culturas de soja, milho e trigo (Amado, 2007) e sua correlação com atributos de solo, como pH, Ca e Mg trocáveis, CTC e argila (Reichert *et al.*, 2008).

Vellidis & Brannen (2012) reportam experimentos da Universidade da Geórgia em cinco estados nos EUA onde os mapas de colheita auxiliaram na localização de áreas de baixa produtividade de algodão. Eles obtiveram altas correlações com os mapas

de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) criados com o Veris 3100; com esses mapas, os pesquisadores identificaram em experimento de 26 ha no Estado de Oklahoma uma área com aproximadamente 2 ha com produtividade muito baixa, sendo muito inferior à média na área estudada (Figura 8A). Após identificarem a causa, foram aplicadas ações corretivas e a mesma área, no ano seguinte, apresentou as mais altas produtividades da lavoura (Figura 8B).

(Fonte: Vellidis e Brannen (2012))



Figura 8. Mapas de produtividade do algodão obtidas em campo com 26 ha, em Altus, Oklahoma, (A) em 2008 antes e (B) em 2009, após as melhorias implantadas

3. Uso de drones na agricultura

Em busca de soluções para o aumento de produtividade das culturas, os agricultores brasileiros vêm usando cada vez mais novas tecnologias no campo. Esse novo produtor não só está automatizando semeaduras e aplicações de insumos, como também está em busca de formas de monitoramento durante o ciclo da cultura que o auxiliem na tomada de decisão em

tempo hábil, de forma a manter ou a melhorar a produtividade da safra em andamento. Além de tratores guiados por GPS, pulverizadores com sensores instalados usados na aplicação de nitrogênio e diversas outras automações, destaca-se também o uso de imagens aéreas de boa qualidade a bordo de drones agrícolas (Figura 9), ou simplesmente VANTS, capazes de coletar imagens que, dependendo do

sensor usado, podem ser multiespectrais ou em RGB convencional. Tais equipamentos muitas vezes são vendidos com softwares para o tratamento prévio das imagens, ou a montagem de cenas mais completas, facilitando o mapeamento aéreo

das lavouras, tendo a vantagem de terem voos planejados de acordo com o desenvolvimento da cultura, permitindo assim a aplicação de defensivos ou suplementação de nutrientes em tempo hábil.

(Fonte: Flygus.com)



Figura 9. Imagem de um drone sobrevoando área agrícola

Esse planejamento proporciona a identificação de pragas, doenças e falhas de plantio com rapidez, facilitando eventuais intervenções durante o ciclo da cultura. Além disso, as imagens são georreferenciadas, possibilitando a aplicação localizada, otimizando o trabalho, minimizando os custos e reduzindo o risco de problemas ambientais.

Além de câmeras e sensores para imageamento, novos sistemas estão sendo adicionados aos VANTs, de forma a torná-los verdadeiras plataformas multifuncionais, que, além de receber e tratar imagens, também atuam diretamente na correção dos problemas detectados, como é o caso das plataformas de pulverização agrícola instaladas em VANTs. A *Figura 10* apresenta um drone pulverizador da Agridrones aplicando defensivo agrícola; o equipamento tem capacidade de transportar até 25 kg e é certificado pelo serviço de aviação civil de Israel.

No Brasil, para o monitoramento de culturas e acompanhamento de safras têm sido utilizadas câmeras digitais com boa resolução, mas que não são métricas. Embora a maioria das fotografias aéreas utilizadas em mapeamento seja obtida com câmeras aerofotogramétricas (em geral, 153 mm), muitas aplicações com finalidades agrícolas têm sido bem sucedidas adotando-se câmeras de 35 mm e 70 mm embarcadas em VANTs para o registro e análise de lavouras (Resende *et al.*, 2019). As câmeras digitais não métricas proporcionam flexibilidade de coleta de dados quando o produtor necessita, pois a obtenção de imagens só depende do operador da aeronave, apresentando as vantagens de baixo custo, simplicidade de operação e boa capacidade de memória, suficiente para armazenar centenas de imagens em um único voo.



Figura 10. Equipamento da Agridones aplicando defensivo agrícola

O processamento de imagens dessas câmeras deve ser feito por método analítico, utilizando-se softwares com funcionalidades específicas. De acordo com Brandão *et al.* (2014), após as correções adequadas, as imagens obtidas por câmeras não métricas podem alcançar precisão similar àquelas obtidas por métodos convencionais da fotogrametria. Embora tenha a vantagem da rapidez na obtenção e armazenamento dos dados, o uso de câmeras digitais de pequeno formato apresenta como desvantagens a necessidade de um número maior de imagens para recobrir a área desejada, distorções geométricas maiores, dificuldade de conseguir a superposição planejada devido às variações de velocidade

durante o voo e dificuldade de estabilização durante o voo (Jorge, 2003; Silva *et al.*, 2005). Jorge (2003) reportou que, após o descarte de várias imagens e o tratamento adequado das imagens escolhidas, foi possível identificar áreas atacadas por doenças e pragas em culturas como soja, milho, eucalipto, cana-de-açúcar e citros (Figura 11).

Depois de georreferenciadas, as imagens devem ser aprimoradas para interpretação visual e confecção de mapas, ressaltando os aspectos de interesse. Todo o processamento e o mapeamento dos dados formarão a base do Sistema de Informações Geográficas (SIG), que, por sua vez, armazenará as informações necessárias à tomada de decisão em AP.

(Fonte: Jorge (2003))



Figura 11. Emprego de imagens aéreas obtidas a partir de câmeras digitais em aeromodelos, para identificação de áreas anormais em lavouras. Imagem da cultura de citros tomada a 50 m de altura, evidenciando a presença de plantas afetadas pela doença “declínio dos citros” (A). Lavoura de soja com área afetada por nematoides (B)

Os planos de voos fotogramétricos são projetados de modo que se tenha uma cobertura completa da área desejada. Para isso devem ser obtidas sucessivas fotografias, idealmente verticais e nadirais, que apresentem uma zona de sobreposição, ou seja, a mesma área da superfície terrestre deverá ser captada e registrada em várias imagens distintas com sobreposição longitudinal entre 60% e 80% e sobreposição transversal entre 20% e 30% do tamanho da cena.

Nesse sentido, câmeras digitais automáticas podem ser programadas em quadros por segundo, dependendo da resolução que se deseja. Após a obtenção das imagens, deve-se observar todas as técnicas de correção necessárias, incluindo as correções de posicionamento e ortorretificação das imagens, as relacionadas com o relevo e com variações da estação de exposição ocorridas durante o voo, bem como os procedimentos de mosaicagem necessários para obtenção de uma imagem única.

A adoção de drones como plataforma de sensores no gerenciamento das fazendas deve sempre ser uma decisão tomada após a revisão completa de questões legais e de responsabilidades envolvidas com a utilização dos veículos. O Regulamento Brasileiro de Aviação Civil nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017) da Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) é complementar às normas de operação de drones estabelecidas pelo Departamento de Controle do

Espaço Aéreo (Decea) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), devendo ser analisado com atenção. Para operar um aeromodelo, as normas da Anac são bem simples, mas deve-se respeitar a distância-limite de terceiros (30 m) e observar as regras do Decea e da Anatel. Aeromodelos com peso máximo de decolagem (incluindo-se o peso do equipamento, de sua bateria e de eventual carga) de até 250 gramas não precisam ser cadastrados junto à Anac. Os aeromodelos operados em linha de visada visual até 120 m acima do nível do solo devem ser cadastrados e, nesses casos, o piloto remoto do aeromodelo deverá possuir licença e habilitação específicos para tal.

O produtor deve estar atento às normas e contratar ou ter profissional habilitado na fazenda para o serviço. Mais informações sobre as regras e os registros de aeronaves não tripuladas devem ser obtidas diretamente dos órgãos gestores citados acima.

No Brasil ainda há certa confusão entre os sensores utilizados para mapeamento de informações de solo e planta com aqueles embarcados pela indústria agrícola para facilitar a operacionalidade do maquinário. Como exemplo, os controladores de seção em pulverizadores são equipamentos acoplados naqueles implementos mas que não têm sua ação necessariamente voltada para aplicação seguindo alguma variabilidade existente no terreno. Nas semeadoras

ocorre a mesma confusão, pois são oferecidas aos produtores alguns modelos com dispositivos de controle de fluxo de fertilizantes e de distribuição de sementes como sendo mecanismos para a AP, mas que, na verdade, também independem da variabilidade existente no terreno (Adamchuck *et al.*, 2004; Resende *et al.*, 2019).

4. Técnicas usadas no tratamento dos dados

Os sensores são úteis para o registro de dados espacializados, mas sem o devido tratamento, a grande quantidade de dados gerados não será aproveitada adequadamente. Dentre as ferramentas, destacam-se o uso da geoestatística e o tratamento de dados de imagens de satélite ou captadas por câmeras instaladas em drones.

Na análise de dados, quanto maior o número de técnicas trabalhadas em conjunto ou em complementaridade, como métodos de estatística multivariada, mineração de dados e geoestatística, maior será a capacidade de obter informações mais representativas da realidade.

Souza *et al.* (2010), estudando a variabilidade de atributos químicos do solo na cultura da cana-de-açúcar, utilizaram geoestatística e mineração de dados, concluindo que a indução de árvores de decisão permitiu verificar que a altitude foi a variável com maior potencial para interpretar os mapas de produtividade de cana-de-açúcar. Nesse caso, as técnicas utilizadas

mostraram-se adequadas para o estudo de definição de zonas de manejo na área cultivada.

De acordo Grego *et al.* (2014), após a obtenção dos dados deve ser realizada uma verificação exploratória nestes com o intuito de verificar a existência de valores discrepantes, conhecidos como outliers, que incluem valores obtidos fora da faixa permitida pelo sensor utilizado, erros de análise laboratorial ou até mesmo erros de digitação. Posteriormente, parte-se para a etapa de análises de variabilidade espacial para se chegar à geração de mapas padronizados e precisos de todos os atributos coletados, a partir da geoestatística.

4.1 A geoestatística e a confiabilidade na tomada de decisão

Ao considerar-se a variabilidade espacial, parte-se do princípio que todas as amostras são relacionadas com seus vizinhos e que amostras separadas por pequenas distâncias são mais parecidas umas com as outras do que amostras separadas por grandes distâncias (Vieira, 2000). Isso possibilita a identificação das áreas de maior e menor variabilidade dentro de um talhão ou região amostrada.

Como exemplo, a *Figura 12* apresenta um mapa de classes da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), obtida dentro de um talhão de cana-de-açúcar de 14 ha, onde a CEa foi obtida usando-se um sensor de solo por indução eletromagnética (equipamento EM38).



Figura 12. (A) Mapa de classes de medidas de condutividade elétrica aparente do solo em talhão de cana-de-açúcar localizado em Ibaté/SP; (B) Medição da condutividade elétrica aparente (CEa) em Ibaté/SP, usando o equipamento EM38 em tubo de PVC

A variabilidade espacial, comprovadamente, pode ser modelada de maneira adequada pela ferramenta geoestatística que é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, por intermédio do ajuste do semivariograma e da interpolação de dados traduzida na forma de mapas digitais, permitindo tomadas de decisões precisas e com maior eficiência (Isaaks e Srivastava, 1989; Vieira, 2000).

Segundo Grego *et al.* (2014) e Oliveira *et al.* (2015), a geoestatística considera que quanto menor a distância entre as amostras, maior

o grau de semelhança entre elas. A análise geoestatística parte da hipótese que existe relação de dependência espacial entre os dados separados por certa distância; tal relação é investigada pela análise do semivariograma, em que é verificada a existência ou não da dependência espacial. Nele são realizados ajustes a uma função em que são determinados os parâmetros efeito pepita (C_0), variância estrutural ou contribuição (C_1) e alcance (a). Na Figura 13, tem-se um exemplo de gráfico ajustado à função esférica do semivariograma.

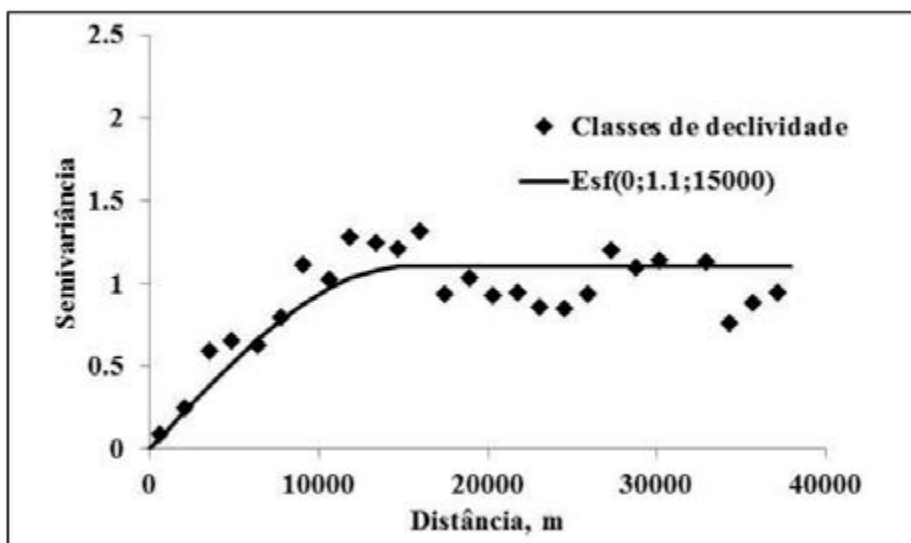


Figura 13. Exemplo de semivariograma ajustado pelo modelo esférico para dados de classes de declividade

Assim, considerando a existência de dependência espacial do atributo em análise, é realizada a interpolação de valores nos locais/pontos que não dispõem de registro do respectivo sensor ou que não foram amostrados em campo. O método mais utilizado em agricultura de precisão é a krigagem ordinária (Inamasu e Benardi, 2014), que consiste em ponderar os vizinhos mais próximos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância.

Ao final, um mapa poderá ser construído em ambiente SIG de maneira a representar adequadamente a variabilidade espacial, como o mostrado na *Figura 14*, produzido a partir de dados de biomassa de pastagem após a identificação da variabilidade espacial por meio da geoestatística. Portanto, um talhão que muitas vezes é considerado uniforme pelo produtor e manejado uniformemente quanto à aplicação de insumos ou controle de pragas e

plantas daninhas poderá receber aplicações em taxa variada de acordo com as diferenças espaciais identificadas.

Dessa forma, a utilização de tecnologias como a geoestatística fornece subsídios para auxiliar em decisões estratégicas e gerenciais, procurando sempre indicar um manejo localizado que traga sustentabilidade econômica e ambiental ao sistema produtivo.

4.2 Softwares para tratamento, geoprocessamento e mineração de dados

Para trabalhar com os novos sensores e as diferentes formas de captação de dados são necessários mais que operadores e técnicos agrícolas de formação convencional. Além disso, com a reserva de mercado, softwares e sensores de empresas concorrentes não possuem compatibilidade (Landau *et al.*, 2014). Assim, a precisão das análises e dos mapas obtidos por meio de dados de sensores dependerá da habilidade dos especialistas em tratar e converter adequadamente dados de formatos diferenciados em linguagem simples, para que sejam acessíveis desde o produtor até o operador de campo (Rezende *et al.*, 2019). Aqui falaremos apenas de alguns tipos de dados e formas de tratá-los.

As imagens obtidas tanto por meio de satélites quanto por meio de imageamento aéreo proximal necessitam processamento para que possam ser úteis ao produtor, auxiliando na tomada de decisão em AP. As imagens oriundas de câmeras a bordo de VANTs, cuja resolução espacial pode chegar a poucos centímetros, são originalmente capturadas em forma de imagens individuais que precisam ser unidas, formando uma imagem única da área de cultivo. Esse procedimento, chamado mosaico de imagens, bem como a retirada de

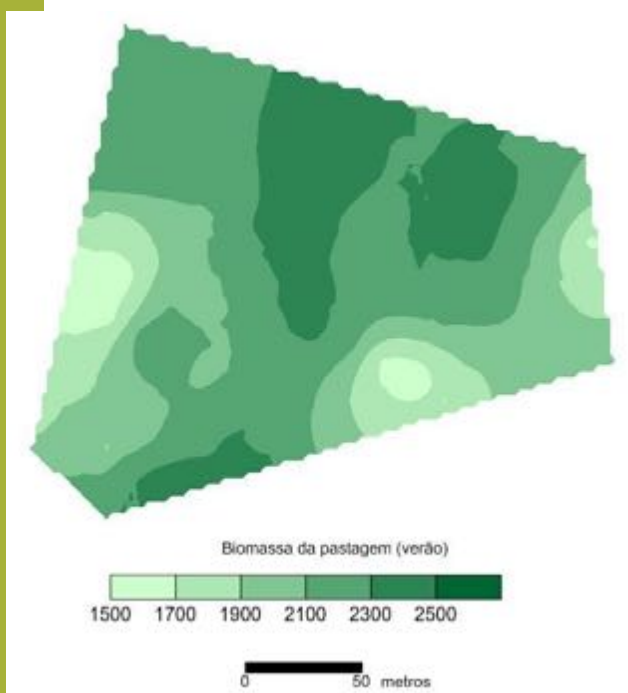


Figura 14. Mapa de isolinhas para biomassa seca da pastagem no período do verão em Nova Odessa/SP

erros originados durante a aquisição dos dados e a correção do posicionamento das imagens, são procedimentos normalmente realizados em solo, por meio de computadores ou servidores com alta capacidade, *softwares* específicos e mão de obra especializada.

Para a execução dessa atividade, existem diversos softwares disponíveis, gratuitos ou pagos; o principal software gratuito é o OpenDroneMap (ODM)(Santos & Koenigkan, 2018) (<http://www.opendronemap.org>). O ODM possui diversos projetos em sua plataforma, sendo possível sua instalação em computador local ou em servidores para prover acesso às ferramentas de mosaicamento.

Em se tratando de softwares pagos, destacam-se as plataformas Pix4D (<https://pix4d.com>) e DroneDeploy (<https://www.dronedeploy.com>), que possuem diversos módulos, incluindo funcionalidades de planejamento de missão e voos e pós-processamento, em que é possível obter mapas de índices como, por exemplo, o NDVI, a partir das imagens mosaicadas, que são amplamente usados em AP. Assim como na plataforma WebODM, as ferramentas de pós-processamento do Pix4D e do DroneDeploy não precisam ser instaladas em computador local, pois são acessadas diretamente pela internet.

Imagens de satélite podem ser tratadas por *softwares* gratuitos como o GvSig ou o QGIS. Um dos principais *softwares* gratuitos para aquisição e tratamento de imagens de satélite usados pela Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa em projeto com parceria do IMAmt tem sido a plataforma Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com>). Por meio dessa plataforma, o usuário pode acessar e processar imagens gratuitas com resolução espacial aceitável para a AP, como as oriundas dos satélites Landsat-8 (30 m) e Sentinel-2 (10 m), sem a necessidade de ter disponíveis as imagens localmente. Entretanto, a plataforma exige certo conhecimento de programação de computadores por parte do usuário, pois as aplicações que realizam geoprocessamento sobre as imagens, tais como geração de séries temporais e mapas de NDVI, são desenvolvidas a partir de *scripts* de linguagem própria da plataforma. Por outro lado, uma vez que o *script* é desenvolvido, ele pode ser compartilhado para outros usuários, sendo que

os próprios *scripts* permitem a criação de interfaces amigáveis para uso. Por permitir o acesso via aplicativos, a plataforma GEE tem servido como base para diversas novas aplicações web para geoprocessamento.

Para obtenção de bons mapas de produtividade são necessários procedimentos de calibração das colhedoras a fim de evitar erros na obtenção dos dados. Mesmo assim, por conta do grande volume de dados produzido, ferramentas de *software* capazes de eliminar erros que ainda possam existir nos mapas, ou até mesmo dados desnecessários para análise, como os coletados nas bordaduras dos talhões, devem ser empregadas para melhorar ainda mais a qualidade da informação. Nesse contexto, podem ser destacados dois *softwares* (ambos gratuitos para uso): Yield Editor (Sudduth & Drummond, 2007), atualmente na versão 2.0.7; e Map Filter (Spekken *et al.* 2013), atualmente na versão 2.0. O Map Filter ainda pode ser utilizado para remoção de erros em mapas com alta densidade de pontos e que não sejam especificamente de produtividade, como os mapas de condutividade elétrica do solo.

Outros dois softwares gratuitos merecem destaque por possibilitarem o tratamento eficiente tanto de imagens georreferenciadas quanto de dados vetoriais. O software R (<https://www.r-project.org>) disponibiliza uma série de bibliotecas gratuitas que permitem realizar diversos procedimentos em dados georreferenciados, tais como: leitura e gravação em diferentes formatos, limpeza dos dados e remoção de *outliers*, interpolação espacial, extração de padrões e modelos de classificação, índices de correlação, dentre outros. Esse software também exige conhecimento prévio de programação de computadores por parte dos usuários, porém aplicativos como o RStudio e RStudio Web (<https://www.rstudio.com>) podem facilitar bastante essas atividades. Outro software gratuito extremamente utilizado para esse fim é o Sistema de Informações Geográficas QGIS (<https://www.qgis.org>). O QGIS é um SIG gratuito com diversas funcionalidades nativas de processamento de imagens e dados vetoriais, que podem ser potencializadas com a inclusão de uma gama de *plugins* gratuitos disponíveis para download, alguns deles específicos para a área de AP. Ao contrário do software R, apenas com conhecimento

de conceitos básicos de geoprocessamento, o usuário já pode realizar diversas operações úteis de tratamento de dados pelo QGIS.

5. Considerações finais

Em determinado momento, a disseminação da AP valeu-se da promessa ou da expectativa de homogeneização das lavouras e da produtividade, condições que, na realidade, não podem ser garantidas de forma permanente como resultado de apenas uma ou algumas intervenções de manejo sítio-específico. A variabilidade espacial é uma característica intrínseca aos ambientes de produção e diferenças de produtividade normalmente são condicionadas por interações entre múltiplos fatores, os quais não são estáticos. Pode-se afirmar que, a cada cultivo, mudam as condições e

ocorrem interferências diversas que podem acarretar alteração dos padrões de variabilidade em um mesmo talhão ao longo do tempo.

Assim, dificilmente os padrões espaciais encontrados, por exemplo, para os atributos de fertilidade química do solo em uma área mantêm-se inalterados com o passar do tempo, independentemente do uso ou não de manejo sítio-específico (Figuras 15 e 16). Raramente se verifica alta correlação entre um fator de produção isolado, seja ele edáfico ou não, com a produtividade em áreas consolidadas de produção tecnificada. Essas constatações reforçam a necessidade de se trabalhar com uma abordagem transdisciplinar na aplicação da AP, visando aproveitar melhor seu potencial na busca de maior eficiência no gerenciamento da propriedade agrícola (Resende e Coelho, 2017).

(Fonte: Wilda, 2013)

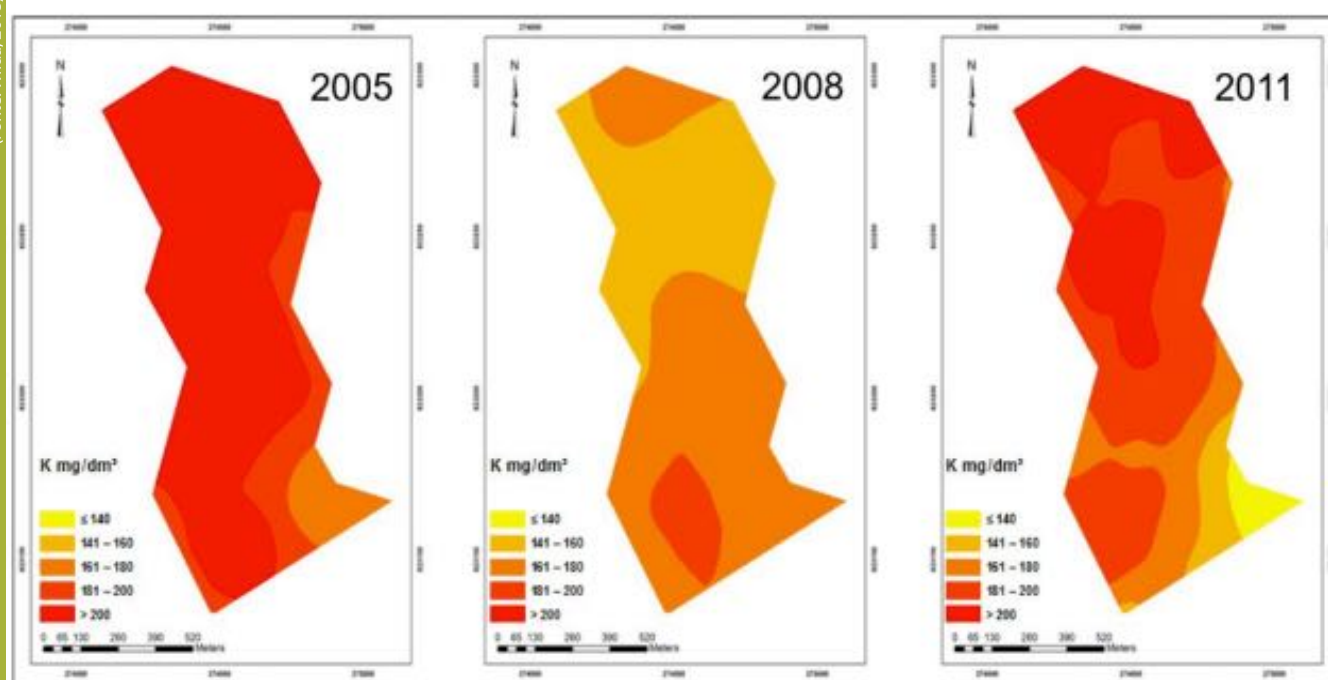


Figura 15. Diferentes padrões de variação da disponibilidade de potássio (K) no solo a partir de amostragens em malha de 2 ha, realizadas em 2005, 2008 e 2011, em lavoura de 119 ha, manejada com adubação a taxa uniforme

Apesar dos obstáculos técnicos e operacionais a serem ainda superados, os benefícios potenciais da AP são muito relevantes e, com a evolução contínua das tecnologias disponibilizadas, diferentes abordagens constituirão alternativas para o agricultor aprimorar as rotinas na fazenda. Muito desse ferramental e das estratégias de obtenção e processamento de dados para tomada de decisão no gerenciamento da variabilidade ainda requerem validação em condições de lavouras comerciais no Brasil. Por fim, é preciso considerar que a aplicação das tecnologias de AP pressupõe certo nível de capacitação técnica nas diversas etapas compreendidas, desde o planejamento de amostragens, processamento de dados, decisão de intervenções no manejo das lavouras, operação de equipamentos agrícolas com eletrônica embarcada, até a análise do desempenho técnico e econômico resultante.

Muito mais do que a operacionalização de soluções pontuais, a tendência que vem se

consolidando nas principais regiões produtoras do Brasil envolve a integração de aplicações da AP em várias frentes/especialidades, que, no todo, contribuem para decisões gerenciais mais bem embasadas e com maior confiabilidade de que se estão fazendo as coisas certas, nos momentos certos e nos locais e nas quantidades requeridas. Esse “fazer o melhor possível” passa a constituir o protocolo natural no dia a dia das fazendas e depende, necessariamente, de um processo dinâmico e sem fim de captura de dados para diagnóstico, processamento de informações, tomada de decisão, intervenção, monitoramento de desempenho, retroalimentação/*feedback* e, se preciso, reorientação do manejo das lavouras. A capacidade de registro, armazenamento e análise/interpretação de informações recentes e históricas das unidades produtivas certamente será um diferencial de competitividade entre agricultores em um futuro próximo.

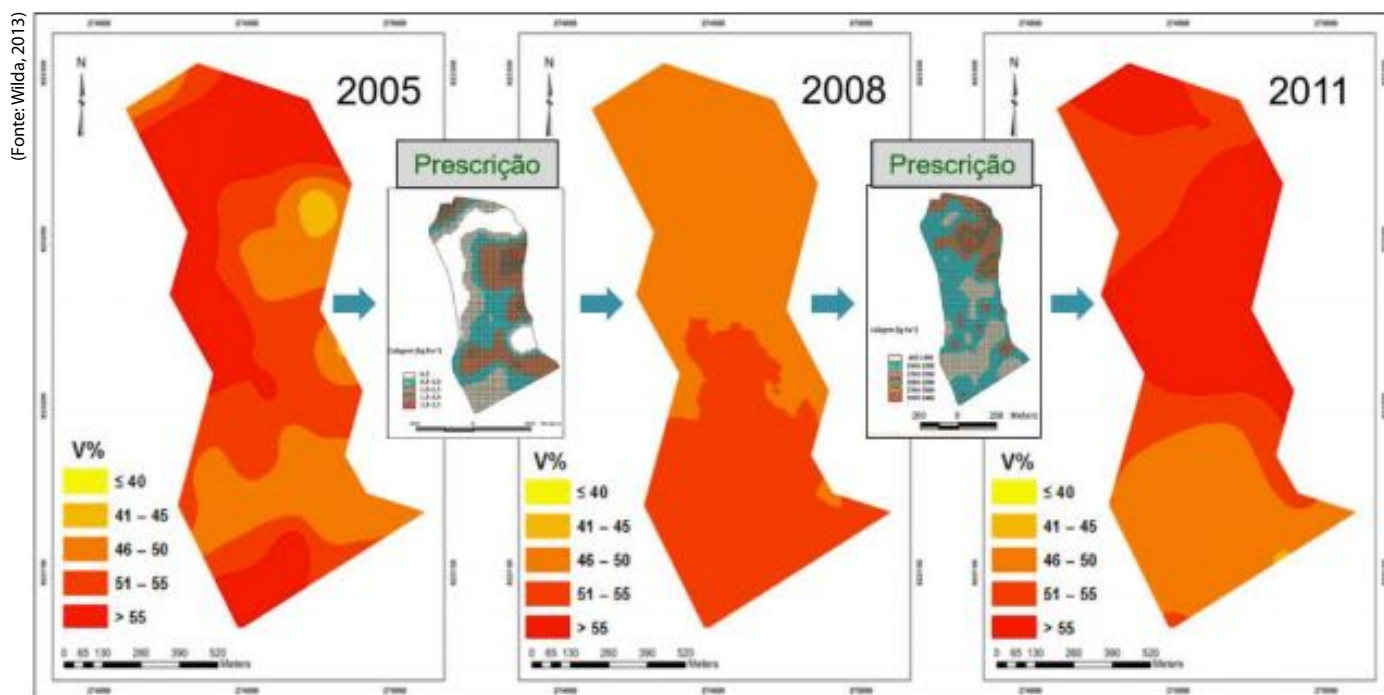


Figura 16. Variação da saturação por bases (V%) no solo a partir de amostragens em malha de 2 ha, realizadas em 2005, 2008 e 2011, em lavoura de 119 ha, manejada com calagem a taxa variável. Nota-se que, depois de seis anos, após dois ciclos de amostragem do solo e aplicação diferencial de calcário, ainda não se evidencia plena uniformização da área, havendo alternância da localização de zonas com maior acidez no talhão

Referências bibliográficas: algumas referências no final do manual. Para complementos, entrar em contato com os autores