

Agricultura de precisão e agricultura digital

Luís Henrique Bassoi¹

Ricardo Yassushi Inamasu²

Alberto Carlos de Campos Bernardi³

Carlos Manoel Pedro Vaz⁴

Eduardo Antonio Speranza⁵

Paulo Estevão Cruvinel⁶

Resumo: Este artigo apresenta e discorre sobre os atributos da agricultura de precisão (AP) e da agricultura digital (AD), expondo as particularidades e sinergias de cada uma delas. Explica como a AP vem sendo empregada nos sistemas de produção vegetal e animal em vários países desde a década de 1990, com uma intensidade e abrangência em relação à área e aos tipos de sistemas de produção que a adotam e que evoluem gradualmente. A AP compreende o uso de procedimentos e de equipamentos, implementos e/ou sensores que avaliam a variabilidade espacial e temporal de atributos do solo, planta, animal ou clima, com o intuito de fornecer informações que subsidiam a tomada de decisão pelo produtor ou profissional quanto à realização de uma prática ou manejo agrícola de modo diferenciado ou variável. Em muitas das atividades realizadas dentro do contexto da AP, a coleta, o armazenamento, a análise e a transmissão de dados ou informações sobre solo, planta, animal ou clima de um específico sistema de produção agrícola, são realizadas por *hardwares* e *softwares*, os quais se enquadram dentro do contexto de AD. Muitos desses procedimentos também podem ser realizados com diferentes graus de automação, parcial ou total. Termos usualmente utilizados na produção vegetal e animal, como “tecnologias de informação e comunicação”, “conectividade”, “internet

1 Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos-sp.
cv Lattes: lattes.cnpq.br/3724572927371418. E-mail: luis.bassoi@embrapa.br.

2 Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos-sp.
cv Lattes: lattes.cnpq.br/1374198108224783. E-mail: ricardo.inamasu@embrapa.br.

3 Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-sp.
cv Lattes: lattes.cnpq.br/5588269274851789. E-mail: alberto.bernardi@embrapa.br.

4 Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos-sp.
cv Lattes: lattes.cnpq.br/2178305101977911. E-mail: carlos.vaz@embrapa.br.

5 Pesquisador, Embrapa Informática Agropecuária, Campinas-sp.
cv Lattes: lattes.cnpq.br/8378526334975196. E-mail: eduardo.speranza@embrapa.br.

6 Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos-sp.
cv Lattes: lattes.cnpq.br/7924553462118511. E-mail: paulo.cruvinel@embrapa.br.

das coisas”, “nuvem”, “algoritmo”, “aplicativo”, “base de dados”, entre outros, podem estar relacionados entre si e com a AP e/ou com a AD. No Brasil, como em muitos outros países, a AP e a AD encontram-se em um processo dinâmico de discussão crítica, desenvolvimento, adaptação, validação e aplicação.

Palavras-chave: Tecnologias de Informação e Comunicação. Conectividade. Internet das Coisas. Nuvem. Algoritmo. Aplicativo. Base de Dados.

Precision farming and digital farming

Abstract: This paper presents and discusses the characteristics of precision agriculture (PA) and digital agriculture (DA), pointing out the peculiarities and synergies of each of them. It explains how several countries since the 1990s have used PA in their systems of plant and animal production in with an intensity and extent in relation to the area and types of production systems that has grown over the years. PA includes the use of procedures and equipment, tools, and/or sensors to evaluate the spatial and temporal variability of soil, plants, animals, or weather . The purpose of PA is to supply information to support decision making in differentiated or flexible ways for planters and other agricultural professionals managing agricultural business. In many PA activities, the collection, storage, analysis, and transmission of soil, plant, animal, or weather data relevant for a specific agricultural production system are performed by hardwares and softwares of DA. Many of these procedures can also be performed with different degrees of automation, either partially or fully. Terms commonly used in plant and animal production, such as information and communication technology, connectivity, internet of things, cloud, algorithm, application, Big Data, among others, can be related to each other as well as to PA and/or DA. In Brazil as well as in other countries, PA and DA are in a dynamic process of critical discussion, development, adaptation, validation, and application.

Keywords: Information and Communication Technologies. Connectivity. Internet of Things. Cloud. Algorithm. Application. Big Data.

Introdução: a agricultura do futuro

Atualmente, a inovação é o grande motor do desenvolvimento econômico e dos ganhos de produtividade e sustentabilidade. A capacidade de inovar é decisiva para a obtenção e manutenção da competitividade em um mercado global. Isso é particularmente verdade no setor agropecuário, no qual novas tecnologias têm proporcionado aumentos significativos de produtividade com sustentabilidade.

Com o advento da revolução verde, os sistemas de produção agropecuários sofreram grandes transformações com a introdução de novas tecnologias de fertilização, correção da acidez do solo, irrigação, uso de pesticidas, novas cultivares, mecanização e outras tecnologias (TILMAN *et al.*, 2002). Entretanto, para enfrentar o desafio de produzir alimentos de forma sustentável e atender às demandas crescentes da população, com previsão de crescimento de mais 2 bilhões até 2050,⁷ a agricultura do futuro necessita aumentar a produtividade, extraindo o máximo de valor de cada etapa do ciclo de produção. O processo de produção deve integrar conhecimentos agronômicos, grandes bases de dados agrícolas (*Big Data*), tecnologias inovadoras de sensores, satélites, veículos aéreos não tripulados, máquinas e robôs autônomos, *softwares* e plataformas em nuvens (em geral, a disponibilidade de recursos computacionais, especialmente armazenamento e processamento, que dispensa o gerenciamento ativo direto do usuário final).

Globalmente, mas especialmente no Brasil, os sistemas de produção agropecuários têm passado por mudanças que sinalizam para a redução da mão de obra e, ao mesmo tempo, para a intensificação de seu uso. Os dados do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010) indicaram que 84,4% da população brasileira era urbana. A previsão é que em 2030 esse índice chegue a 91,1%. Esta redução da população rural tem levado a um grande impacto na disponibilidade e qualidade da mão de obra no campo. O estudo de Manyika *et al.* (2017) prevê que metade de todas as atividades hoje

⁷ Dados disponíveis em: un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html. Acesso em: 08 dez. 2019.

desempenhadas por trabalhadores poderão ser automatizadas até 2055. E, segundo esses autores, a revolução digital e a automação também ocorrerão na agricultura e em setores da produção de alimentos. Desta forma, o uso de automação, com máquinas, equipamentos, sensores e atuadores, será imprescindível para garantir a segurança alimentar no futuro, e essas mudanças trarão ganhos importantes em eficiência, auxiliando a agricultura a tornar-se uma atividade cada vez mais sustentável.

A agricultura de precisão (AP) é uma técnica de manejo que considera a variabilidade espacial e permite a aplicação sítio-específica de insumos, como fertilizantes, corretivos, pesticidas, sementes, água e outros. Considerando também a variabilidade temporal, a AP permite uma utilização mais racional dos insumos, no momento, local e dose corretos, com potencial de benefícios econômicos e ambientais (Ezenne *et al.* 2019). Sendo a AP um sistema de manejo e gestão da produção altamente dependente de dados e informações de campo (plantas, animais, solo, clima, máquinas etc.), georreferenciados, digitalizados e de alto fluxo, ela fornece uma base estrutural e conceitual para conectar os sistemas de produção agropecuários ao mundo digital, abrindo um canal de coleta e compartilhamento de dados a partir do campo.

Desde o surgimento do processo de georeferenciamento por receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e seu uso na AP há mais de 20 anos, ocorreram grandes avanços em termos de tecnologias de máquinas, equipamentos e sensores para o georeferenciamento e mapeamento da variabilidade espacial, aplicação de insumos a taxa variável e outras tecnologias embarcadas que contribuíram para o aumento da eficiência dos processos de plantio, pulverização, adubação, correção do solo e colheita. Isso já pode ser considerado como uma contribuição estimulada por demandas da AP.

O levantamento realizado pelo Grupo Kleffmann, com 992 produtores das regiões Sul, Centro-Oeste e do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) indicaram a adoção de algum tipo de tecnologia de AP por 45% dos entrevistados, sendo que a aplicação de sementes, agroquímicos e fertilizantes à taxa variável foi de 13%, 14% e 26%, respectivamente. Entretanto, apenas 15% disseram utilizar a amostragem georreferenciada do solo para o mapeamento da fertilidade, que é a base para a aplicação à taxa variável de fertilizantes (MOLIN, 2017).

Os principais desafios da AP estão relacionados à dificuldade em se entender as principais causas que provocam variabilidades das características dos solos e das plantas, falta de recomendações agronômicas (curvas

de resposta) específicas para aplicação à taxa variável, alto custo das operações de mapeamento do solo em uma escala desejável, necessidade de aprimoramento das técnicas de sensoriamento remoto para aplicações à taxa variável, falta de procedimentos padronizados e carência de mão-de obra especializada em AP nos diversos níveis (equipes técnicas, consultores e pesquisa).

A automação no meio rural é uma realidade. Ela ocorre em todas as etapas dos sistemas de produção (preparo e plantio, colheita, tratamentos culturais, processamento etc.) visando o aumento da produtividade; otimização do uso do tempo, insumos e capital; redução de perdas na produção; aumento da qualidade dos produtos e melhoria da qualidade de vida do trabalhador rural. Entretanto, a introdução dos novos conceitos da AP e das ferramentas da era digital, com grande conectividade e integração de sensores e dados, tem gerado novas demandas tanto em termos de novos dispositivos como de integração de sistemas, de novos métodos e protocolos. Devido à complexidade dos processos de produção agropecuária, que inclui aspectos biológicos, ambientais e socioeconômicos, a automação constitui-se em uma fronteira com enorme oportunidade de avanço. Neste trabalho, são apresentados alguns conceitos e aplicações da AP e agricultura digital (AD), bem como novas oportunidades e desafios a serem atacados.

Agricultura de precisão

A agricultura de precisão (AP) pode ser definida como o uso de práticas agrícolas com base nas tecnologias de informação (TI) e ferramentas da mecanização e automação, considerando a variabilidade do espaço e do tempo sobre a produtividade das culturas. Ela pode ser entendida como um ciclo que se inicia na coleta dos dados, análises e interpretação dessas informações, geração das recomendações, aplicação no campo e avaliação dos resultados (GEEBERS; ADAMCHUK, 2010). Dessa forma, a AP é uma ferramenta que auxilia os produtores na tomada de decisões gerenciais no manejo das culturas, levando em conta a variabilidade espacial e temporal da lavoura para obter máximo retorno econômico e reduzir o impacto ambiental (INAMASU *et al.*, 2011). É, portanto, uma cadeia de conhecimentos, na qual máquinas, dispositivos, equipamentos e *softwares* são ferramentas para a coleta de dados, os quais devem ser organizados e interpretados, gerando informações para apoiar a gestão (INAMASU; BERNARDI, 2014).

As ferramentas de AP têm sido utilizadas com maior frequência nas culturas de grãos, cana-de-açúcar, hortícolas, fruteiras e silvicultura (BERNARDI; INAMASU, 2014), porém têm grande potencial para utilização em todos os sistemas agropecuários, incluindo os sistemas integrados.

A automação é como um sistema no qual os processos operacionais de produção agrícola, pecuária e/ou florestal são monitorados, controlados e executados por meio de máquinas e ou dispositivos mecânicos, eletrônicos ou computacionais para ampliar a capacidade de trabalho humano (INAMASU *et al.*, 2016). A AP pode ser citada também como um caso de sucesso de emprego da automação. Muitos dispositivos utilizados na AP são equipamentos e máquinas agrícolas com grande utilização de eletrônica e sistemas digitais. Entre as tecnologias que fizeram com que a AP ganhasse visibilidade e fosse empregada, e ao mesmo tempo também fizeram o uso da automação de forma exitosa, estão os receptores GNSS, ou simplesmente *Global Positioning System* (GPS). A tecnologia foi inicialmente disponibilizada na década de 1980 para uso militar e, na década seguinte, surgiram as aplicações para o uso na agricultura. Ao ser instalado em máquinas para colheita, inicialmente de grãos, viabilizou-se a leitura da variabilidade espacial da produção. O primeiro mapa de produtividade, com base em um monitor de rendimento ligado ao GPS, foi produzido em 1990 na Alemanha, para uma lavoura de canola (SCHNUG *et al.*, 1991). O receptor GNSS em um formato mais básico fornece a cada segundo o valor da latitude e longitude do local em que esse equipamento se encontra. Essa coordenada geográfica, ao ser armazenada em arquivo com dados sincronizados com a leitura da produção fornecida por sensor da colhedora, permite a obtenção de um arquivo com a produtividade a cada ponto do campo, a qual é visualizada em um aplicativo na forma de mapa. Em resumo, é possível afirmar que a adoção da AP em uma propriedade rural faz com que o ciclo de produção possa ser gerido por conjuntos de dados georreferenciados em diferentes níveis, desde os que são coletados em campo, até os que são transformados em modelos inteligentes e posteriormente utilizados em intervenções espacialmente diferenciadas ou em taxas variadas de aplicação de insumos. É dessa transformação da agricultura convencional para uma agricultura mais precisa e inteligente, baseada em dados, que surgiram os conceitos de agricultura inteligente (AI) e agricultura digital (AD).

Agricultura digital

A literatura sobre agricultura inteligente (AI) ou *smart farm* (SF) é recente. O conceito e os termos associados à AI não chegaram a um consenso na literatura científica (WOLFERT *et al.*, 2017). Os rápidos desenvolvimentos na internet das coisas – *internet of things*, IoT (VERDUM *et al.*, 2016) – e a computação em nuvem estão impulsionando a AI (SUNDMAEKER *et al.*, 2016) ou AD. A base para o avanço neste setor envolve uma combinação de tecnologias da internet e tecnologias orientadas para o uso de objetos inteligentes (BRETTEL *et al.*, 2014; LIAO *et al.*, 2017). No entanto, de acordo com Wolfert *et al.* (2017) ainda não existe um conceito estabelecido para essas tecnologias na agricultura.

Mas se a AP considera a variabilidade no campo, a AI vai além, pois estabelece as ações de gerenciamento, não apenas com base na localização do campo, mas também nos dados armazenados, reforçada pelo contexto e da situação da lavoura, e ainda alimentado por dados coletados em tempo real (WOLFERT; SØRENSEN; GOENSE, 2014). Desta forma, existem interfaces e tecnologias que se sobrepõem e englobam ideias como AP e sistemas de informação de gestão na agricultura, que foram derivados da ideia do sistema de informação de gerenciamento da propriedade (*Farm Management Integrated System*, FMIS). O FMIS foi definido por Sørensen *et al.* (2010) como um sistema projetado para coletar, processar, armazenar e disseminar dados em um formato padronizado para executar operações e funções em propriedades rurais.

A AI incorpora as tecnologias de informação e comunicação em máquinas, equipamentos e sensores em sistemas de produção agrícola, e permite gerar um grande volume de dados e informações com inserção progressiva de automação no processo (PIVOTO *et al.*, 2017). Atualmente, as principais aplicações estão na Europa e América do Norte.

O uso de ferramentas de AI é possível devido aos sensores desenvolvidos para uso na agricultura. De acordo com Lehmann *et al.* (2012), um sensor é um dispositivo eletrotécnico que responde a um estímulo físico/químico de maneira específica, e que pode ser transformado em uma grandeza física ou um sinal, para fins de medição e/ou monitoramento por um instrumento.

A AD, devido ao aporte computacional disponível aos usuários, introduziu um novo nível de tecnologia, que inclui a robótica, sensoriamento remoto, geoprocessamento, tomada de decisão e processos estatísticos. Soma-se a isso, ainda, o surgimento da IoT, que permite que objetos se-

jam controlados remotamente por meio de uma rede, criando uma integração direta entre o mundo físico e os sistemas baseados em computador (LEHMANN *et al.*, 2012). A aplicação dos conceitos de IoT na área agrícola tem um grande potencial de crescimento, pois as tecnologias como Rede De Sensores Sem Fio (RSSF) e de identificação por frequência de rádio (*Radio Frequency Identification*, RFID) estão se tornando cada vez mais acessíveis e de baixo custo. E assim, surgem as chamadas fazendas inteligentes ou *smart farms* (KALOXYLOS *et al.*, 2012), nas quais o agricultor utiliza estas tecnologias, associadas à localização móvel e ao acompanhamento e monitoramento de objetos em tempo real.

A obtenção de dados e informações

Com a AD, cresceu muito a capacidade de aquisição de dados, que leva necessariamente à necessidade de organização (*data warehouse*) para visualização, processamento, análise e/ou disponibilização e tratamento desses dados. Queirós *et al.* (2014) recomendam que a integração de dados espaciais e temporais dos agroecossistemas seja tratada por padrões de representação e comunicação (agroXML, ISOBUS, entre outros) entre sistemas numa arquitetura computacional distribuída, como a arquitetura orientada a serviço (*Service-Oriented Architecture*, SOA). Devido à vasta quantidade de dados e informações obtidas, o processamento e análise em infraestruturas de alto desempenho computacional, como a computação em nuvens, *grid*, processamento paralelo, entre outros, são necessários para o desenvolvimento de um sistema de informação de gestão agrícola automatizado que seja robusto e confiável. Atualmente, as diversas fontes de dados coletados e metodologias de análise para geração de informação desenvolvidos por diversas instituições públicas e privadas têm sido compartilhadas, de maneira gratuita ou por meio de assinaturas cujos valores são calculados por requisições, em SOAs conhecidas como interfaces de programação de aplicações (*Application Programming Interface*, API). As APIs são conjuntos de definições de subrotinas, protocolos de comunicação e ferramentas para o desenvolvimento de *software*, com métodos de comunicação bem definidos entre vários componentes. Assim, os sistemas de gestão agrícola baseados em APIs têm se tornado plataformas digitais inteligentes, capazes de fornecer informações de qualidade e de alto valor agregado para o produtor rural.

Manejo das culturas

As aplicações de sensoriamento remoto na agricultura baseiam-se na interação de radiação eletromagnética com o solo ou a planta. Normalmente, o sensoriamento remoto envolve a medição de radiação refletida, em vez de transmitida ou absorvida. A detecção remota na agricultura refere-se às medidas sem contato das radiações refletidas, ou emitidas em áreas agrícolas, podendo ser feita por meio de satélites, aviões, veículos aéreos não tripulados e por sensores portáteis acoplados às máquinas agrícolas ou carregados pelo ser humano (SHIRATSUCHI *et al.*, 2014). Medições feitas por sensores portáteis são conhecidos como sensoriamento proximal, especialmente se eles não envolvem medidas da radiação refletida (MULLA, 2013). Dados da refletância têm sido associados às características das plantas, por meio de combinações matemáticas, sendo tais transformações conhecidas como “índices de vegetação” (SHIRATSUCHI *et al.*, 2014).

O índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Of Vegetation Index*, NDVI) ou o índice relativo de clorofila, que se relacionam com o teor de nitrogênio na folha, são exemplos de índices largamente utilizados na agricultura. Por meio de sensores portáteis que possibilitam a sua determinação, é possível manejar espacialmente a adubação nitrogenada, como nos casos reportados em milho por Hurtado *et al.* (2009) e em trigo por Bredemeier *et al.* (2013). Zonas homogêneas quanto ao vigor das plantas para a realização de práticas diferenciadas, como a colheita seletiva em videira de vinho, também podem ser determinadas por meio de índices de vegetação (COSTA *et al.*, 2018).

Manejo do solo

As propriedades do solo podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até a escala regional em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas (CAMBARDELLA; KARLEN, 1999). Essas variações das propriedades do solo devem ser monitoradas e quantificadas para entender os efeitos do uso da terra e sistemas de gestão de solos. Por isso, atualmente, os levantamentos de solos têm um foco maior em modelagem quantitativa com o acompanhamento para fornecer informações que considerem a acurácia e incertezas (MCBRATNEY *et al.*, 2000). Estudos quantitativos em solos têm sido desenvolvidos na área da pedometria, que pode ser definida como o desenvolvimento de modelos numéricos ou estatísticos das relações entre variáveis ambientais e o solo, os quais são então aplicados a um banco de dados geográfico para criar um mapa preditivo (SCULL *et al.*, 2003).

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades químicas e físicas do solo é útil para a interpretação das zonas de manejo, mas também para o uso racional de insumos, como na aplicação de taxa variável de calcário e fertilizantes (BERNARDI *et al.*, 2015, 2016) e de água (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Existe grande variedade de sensores de solo, os quais utilizam princípios ópticos, eletromagnéticos, eletroquímicos, mecânicos, fluxo de ar e acústicos (ADAMCHUCK *et al.*, 2004). A maioria desses sensores fornece um sinal de saída, que pode ser influenciado por propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

As medidas de Condutividade Elétrica Aparente (CEa) têm sido muito utilizadas no mapeamento do solo, uma vez que integram frações granulométricas e disponibilidade de água, duas características do solo que afetam a produtividade, e pode auxiliar na interpretação das variações de rendimento das culturas (RABELLO *et al.*, 2014). Há trabalhos relacionando esta medida com a variabilidade espacial da produção das culturas (LUCCHIARI *et al.*, 2001). Oldoni *et al.* (2019) relacionaram maiores valores de CEa com maior vigor vegetativo e rendimento da videira de vinho irrigada por gotejamento. No Brasil, Machado *et al.* (2006) verificaram que os valores da CEa estavam relacionados com o teor de argila do solo e sua variabilidade espacial, tendo sido útil para o estabelecimento dos limites de zonas de manejo em lavoura de soja. A Figura 1 ilustra as diferenças na CEa dentro de um talhão de cultivo de cana-de-açúcar, indicando que há manchas de solo dentro desta área tratada de forma homogênea, e que deveriam ser consideradas na recomendação de herbicidas, corretivos e fertilizantes (VERRUMA *et al.*, 2017).

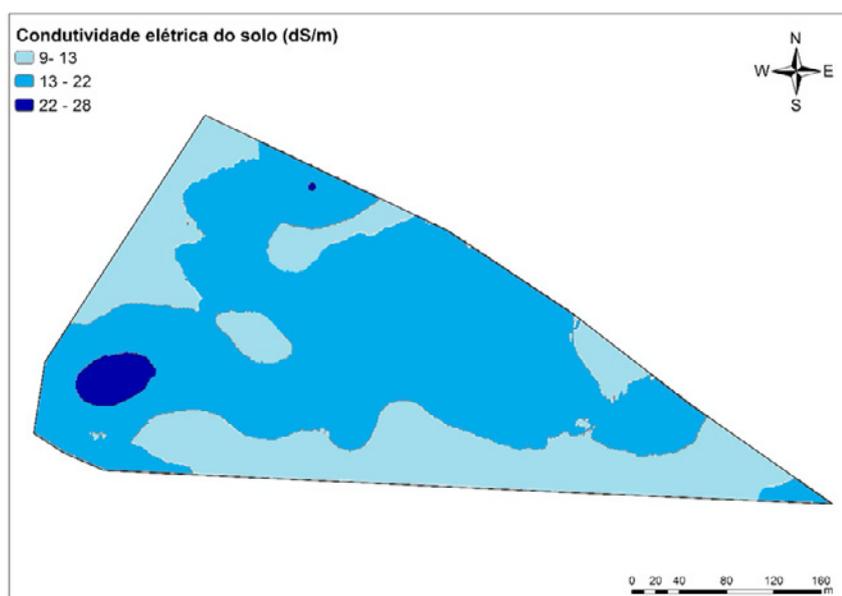


Figura 1. Mapa da condutividade elétrica do solo em talhão cultivado com cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Verruma *et al.* (2017).

A contribuição das ferramentas de AP na sustentabilidade dos sistemas agropecuários vai além do mapeamento das necessidades de insumos, produção e extração de nutrientes. Podem também contribuir para o planejamento conservacionista, como mostraram Berry *et al.* (2003; 2005). Os autores demonstraram a conservação do solo e da água por meio da utilização de tecnologias espaciais integradas (GPS, sensoriamento remoto e Sistema de Informações Geográficas – SIG), que auxiliam na análise das relações espaciais e temporais para uma melhor compreensão do funcionamento destes sistemas. Dessa forma, seria possível selecionar as práticas de manejo que maximizem os rendimentos e qualidade das culturas, concomitantemente à otimização do uso de insumos, e às reduções nas perdas de solo e água das áreas agrícolas (DELGADO; BERRY, 2008). E isso pode ser alcançado a partir da determinação da altimetria, do estabelecimento dos fluxos de água e das áreas de risco de erosão.

Manejo da água

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo pode contribuir para um manejo do solo e da água adequado a uma situação local, pois além da relação com a produtividade das culturas, eles estão relacionados com o escoamento superficial, infiltração, retenção e distribuição da água no solo.

A condutividade elétrica aparente e a densidade do solo, junto com a topografia (elevação do terreno), podem ser parâmetros de medida para a estimativa da variação espaço-temporal da água no solo, podendo ser utilizados para a definição de zonas de manejo com base na umidade armazenada no perfil do solo, uma vez que apresentam significativa correlação com a produtividade das culturas em condição de sequeiro (IBRAHIM; HUGGINS, 2011).

A irrigação é uma prática agrícola que minimiza as incertezas quanto à disponibilidade de água à cultura ao longo do ciclo de cultivo, o que pode contribuir para o aumento da produção em termos quantitativos e qualitativos. A variabilidade espacial da umidade do solo ocorre tanto no sentido horizontal como vertical, em decorrência dos inúmeros tamanhos das partículas do solo e dos seus arranjos, o que confere ao solo a variação de textura e de porosidade. Assim, os atributos do solo também auxiliam na escolha do sistema de irrigação a ser utilizado, na determinação do volume a ser aplicado e na frequência de aplicação de água por um sistema de irrigação.

A definição das zonas homogêneas com base nos atributos físico-hídricos do solo, para o monitoramento da umidade na camada de solo na qual o sistema radicular da cultura está presente, pode ser o primeiro passo para um posterior manejo diferenciado da água, de acordo com o sistema de irrigação em questão (NASCIMENTO *et al.*, 2014; OLDONI; BASSOI, 2016; OLDONI *et al.*, 2018). Em um pomar de videira de mesa irrigado por microaspersão, e com manejo diferenciado da irrigação com base na umidade em diferentes zonas de armazenamento de água na camada de solo de 0-0,40m, a aplicação de água durante o ciclo da cultura foi menor e maior nas zonas com maior e menor armazenamento, respectivamente (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Manejo de plantas invasoras, pragas e doenças

A aplicação de produtos químicos para o controle de plantas invasoras, pragas e doenças também pode se valer de procedimentos da AP para que haja uma melhor determinação do nível e da variabilidade espaço-temporal de infestação em uma área agrícola, bem como para a realização de aplicação do insumo em taxa variável, reduzindo a quantidade de produto químico aplicado, o que pode levar a uma maior eficácia e eficiência de sua aplicação.

Nesse sentido, Cruvinel, Karam e Beraldo (2014) descreveram o potencial da aplicação da visão computacional para o auxílio no controle de plantas invasoras por meio da aplicação de produtos químicos. Jorge e Inamasu (2014) apresentaram o potencial do uso de imagens multiespectrais, juntamente com ferramentas de SIG, para a detecção precoce do *greening* em citros, podendo tal procedimento ser aplicado a outras doenças. Santi *et al.* (2014) mostraram que o monitoramento georreferenciado de lagarta desfolhadora da soja é uma importante ferramenta de suporte ao manejo integrado de pragas, uma vez que a correlação entre a presença de lagartas e o rendimento de grãos foi baixa ou ausente, indicando que populações abaixo do nível de controle indicado não afetaram o rendimento da cultura. A Figura 2 ilustra as diferenças no % de ocupação da planta invasora *Bidens pilosa* dentro de um talhão de cultivo de milho, indicando que há manchas com diferentes ocupações, não sendo necessário o tratamento de forma homogênea, o que levaria a um consumo maior de herbicidas.

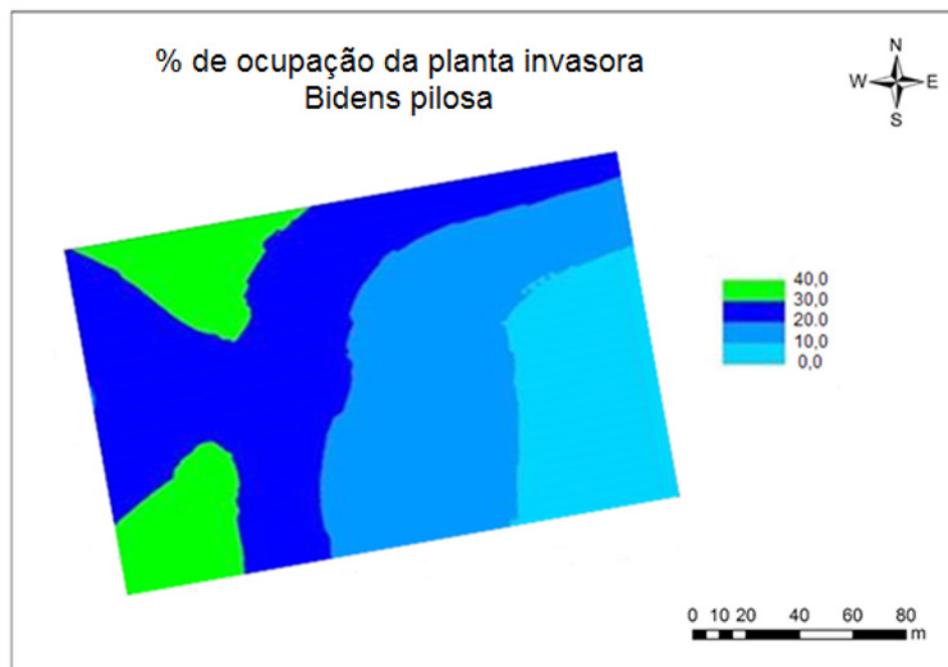


Figura 2. Mapa do % de ocupação da planta invasora *Bidens pilosa* em área de plantio de milho. Fonte: Cruvinel *et al.* (2015).

A análise dos dados

O uso da geoestatística na AP tem por objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e estimar as inter-relações desses atributos no espaço e no tempo. A partir dos modelos ajustados dos semivariogramas,⁸ interpola-se os dados pela técnica da krigagem,⁹ gerando vários mapas ou superfícies de informação (GREGO; OLIVEIRA, 2015). A modelagem via sistema de informações geográficas (SIG) possibilita a fusão dessas camadas de informações ampliando a capacidade de interpretação dos dados e auxiliando na tomada de decisão para a gestão do sistema de produção (FILIPPINI ALBA, 2014). Para a AP, o banco de dados de um SIG deve ser constituído por diferentes temas, em que cada tema represente dados espaciais georreferenciados das variáveis em estudo, como por exemplo, relevo, classes de solos, propriedades químicas e físicas, produtividade, ocorrência de pragas, doenças e plantas invasoras etc.

Mesmo em pequenas áreas, é possível a aplicação de ferramentas de SIG para o planejamento ambiental, como demonstrado por Schrammel e Gebler (2011), onde os dados históricos de produtividade da macieira em

⁸ Ferramenta utilizada para representar a continuidade espacial de uma função e, assim, descrever qualitativa e quantitativamente a variação espacial.

⁹ Método usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados.

cada talhão foram registados, considerando a heterogeneidade da propriedade agrícola.

O processo de análise de dados também envolve a utilização de ferramentas computacionais baseadas em inteligência artificial para que os dados coletados e pré-processados sejam transformados em informações úteis ao produtor. Ferramentas de aprendizado de máquina, como algoritmos de classificação supervisionada e não supervisionada, bem como ferramentas de aprendizado profundo, como as redes neurais convolucionais, podem ser utilizadas em diversas atividades de AP, tais como o delineamento de zonas de manejo (BAZZI *et al.*, 2013), classificação de culturas (HAUG; OSTERMANN, 2014), identificação de pragas e doenças (GRINBLAT *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2017), geração de modelos de recomendação (GOLDSTEIN *et al.*, 2018), dentre outras. Essas ferramentas não estão normalmente disponíveis em SIGs e exigem conhecimento específico em *softwares* e bibliotecas de análise (por ex., R, Weka, Matlab) para que sejam utilizadas corretamente, a ponto de fornecerem informações confiáveis ao produtor.

A intervenção e alguns exemplos de aplicações

A aplicação de insumos à taxa variável tem sido a principal forma de uso das ferramentas de AP no manejo das culturas (BERNARDI; INAMASU, 2014). A Figura 3 mostra um mapa de recomendação de adubação fosfatada estabelecido a partir de amostras de solo georreferenciadas. Observa-se que a aplicação de fertilizantes sem considerar a variabilidade espacial pode levar a impactos ambientais e econômicos negativos e, dessa forma, comprometer a sustentabilidade do sistema de produção agropecuário (SANTOS *et al.*, 2017; BERNARDI *et al.*, 2016).

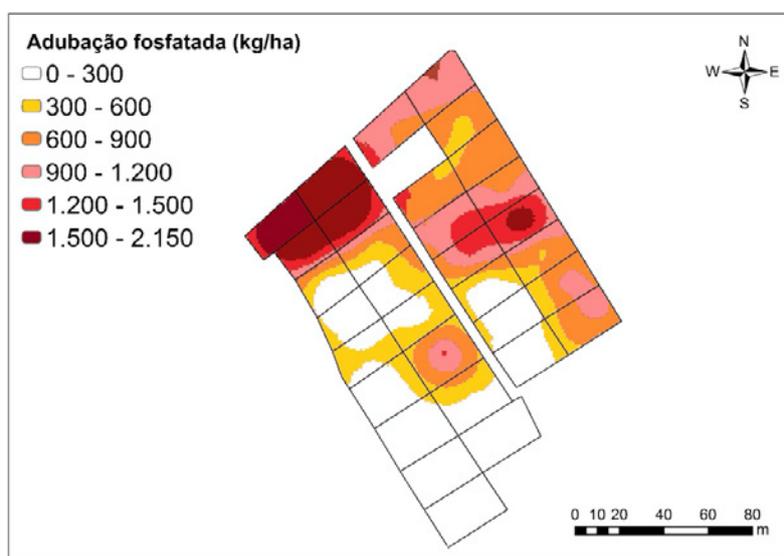


Figura 3. Mapa de recomendação de adubação fosfatada.
Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2017).

Desafios e oportunidades

A tendência atual de elevação dos custos de produção, redução da mão-de-obra, aumento das exigências dos mercados por alimentos mais seguros, mudanças climáticas, conservação dos recursos naturais e contaminação ambiental são fatores que têm contribuído para a intensificação do desenvolvimento da automação e da agricultura de precisão.

Este cenário tem exigido a implementação de novas práticas agrícolas, cada vez mais multidisciplinares, nas quais a automação e a agricultura de precisão são elementos chaves. No entanto, para que haja uma maior contribuição com a sustentabilidade da produção agropecuária, será necessário que as máquinas e equipamentos tornem-se mais adequadas aos produtores, e que haja capacitação para que os técnicos, produtores e prestadores de serviços adotem as novas tecnologias disponíveis.

Referências

- ADAMCHUK, V. I. *et al.* On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 44, p. 71-91, 2004.
- BAZZI, C. L., *et al.* Management zones definition using soil chemical and physical attributes in a soybean area. *Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 5, p. 952-964, 2013.
- BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; FERREIRA, R. P.; SANTOS, K. E. L.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision Agriculture*, v. 17, p. 737-752, 2016.
- BERNARDI, A. C.; INAMASU, R. Y. Adoção da agricultura de precisão no Brasil. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 559-577.
- BERNARDI, A. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília: Embrapa, 2014. 596 p.
- BERNARDI, A. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília v. 32, n. 1/2, p. 205-221, 2015.
- BERRY, J. K.; DELGADO, J. A.; PIERCE, F. J.; KHOSLA, R. Precision conservation for environmental sustainability. *Journal of Soil and Water Conservation*, n. 58, v. 6, p. 332-339, 2003.

- BERRY, J. K.; DELGADO, J. A.; PIERCE, F. J.; KHOSLA, R. Applying spatial analysis for precision conservation across the landscape. *Journal of Soil and Water Conservation*, n. 60, v. 6, p. 363-370, 2005.
- BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. *Ciência Rural*, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, 2013.
- BRETTEL, M. *et al.* How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an industry 4.0 perspective. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.
- CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, v. 1, p. 5-14, 1999.
- CHENG, X. *et al.* Pest identification via deep residual learning in complex background. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 141, p. 351-356, 2017.
- COSTA, B. R. S. *et al.* Delimitação de zonas homogêneas em vinhedo por meio de análise geoestatística e multivariada de diferentes índices de vegetação. In: *Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão*, 2018, Curitiba. Construção dos dados na era da digitalização agrícola. Curitiba: AsBraAP, 2018. p. 45-51.
- CRUVINEL, P. E.; KARAM, D.; BERALDO, J. M. G. Agricultura, precisão e manejo de plantas invasoras na cultura do milho. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014.,v. 1, p. 135-156.
- CRUVINEL, P. E.; KARAM, D.; BERALDO, J. M. G. Method for the precision application of herbicides in the controlling of weed species into a culture of maize. In: VII SINTAG, Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação, 14 a 16 de setembro – Uberlândia/MG, pp. 4, 2015.
- EZENNE, G. I. *et al.* Current and potential capabilities of UAS for crop water productivity in precision agriculture. *Agricultural Water Management*, v. 218, p. 158-164, 2019.
- DELGADO, J. A., BERRY, J. K. Advances in precision conservation. *Advances in Agronomy*, n. 98, p. 1-44, 2008.

- FILIPPINI ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. *In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (org.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.* Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 84-95.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. *Science*, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. Conceitos básicos da Geoestatística. *In: OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDAO, Z. N. (org.). Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper.* Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 41-62.
- HAUG, S.; OSTERMANN, J. A crop/weed field image dataset for the evaluation of computer vision based precision agriculture tasks. *In: European Conference on Computer Vision.* Springer, Cham, 2014. p. 105-116.
- HURTADO, S. M. C. *et al.* Variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura no cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 3, p. 300-309, 2009.
- IBRAHIM, H. M.; HUGGINS, D. R. Spatio-temporal patterns of soil water storage under dryland agriculture at the watershed scale. *Journal of Hydrology*, n. 404 p. 186-197, 2011.
- INAMASU, R. Y. *et al.* *Portfólio automação agrícola, pecuária e florestal.* São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2016. 14 p. (Embrapa Instrumentação. Documentos, 60).
- INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. *In: BERNARDI, A. C. C. et al. (org.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.* Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33.
- INAMASU, R. Y. *et al.* Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro. *In: INAMASU, R.Y. et al. (org.). Agricultura de precisão: um novo olhar.* São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 14-26.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico 2010.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2010. Disponível em: ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010. Acesso em: 12 set. 2019.
- GOLDSTEIN, A. *et al.* Applying machine learning on sensor data for irrigation recommendations: revealing the agronomist's tacit knowledge. *Precision agriculture*, v. 19, n. 3, p. 421-444, 2018.

- GRINBLAT, G. L. *et al.* Deep learning for plant identification using vein morphological patterns. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 127, p. 418-424, 2016.
- JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Detecção do greening dos citrus por imagens multiespectrais. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 180-190.
- KALOXYLOS, A. *et al.* Farm management systems and the Future Internet era. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 89, p. 130-144, 2012.
- KITCHEN, N. R. Emerging technologies for real-time and integrated agriculture decisions. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 61, p. 1-3, 2008.
- LEHMANN, R. J.; REICHE, R.; SCHIEFER, G. Future internet and the agri-food sector: state-of-the-art in literature and research. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 89, p. 158-174, 2012.
- LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. D. F. R.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of industry 4.0 – A systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.
- LUCHIARI JUNIOR, A. *et al.* (org.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 60-64.
- MACHADO, P. L. O. A. *et al.* Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 41, p. 1023-1031, 2006.
- MANYIKA, J. *et al.* *A future that works: Automation, employment, and productivity*. McKinsey Global Institute, New York, 2017. Disponível em: mckinsey.com/global-themes/digital-disruption/harnessing-automation-for-a-future-that-works. Acesso em: 12 set. 2019.
- MCBRATNEY, A. *et al.* An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, v. 97, n. 3-4, p. 293-327, 2000.
- MCBRATNEY, A. *et al.* Future directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, v. 6, p. 7-23, 2005.
- MOLIN, J. P. Agricultura de Precisão: números do mercado brasileiro. *Agricultura de Precisão - Boletim Técnico* 03, ESALQ/USP, Piracicaba, 2017, 7p.
- MULLA, D. J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, v. 114, p. 358-371, 2013.

- NASCIMENTO, P. S. ; BASSOI, L. H.; SILVA, J. A.; COSTA, B. R. S. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1101-1113, 2014.
- NUMATA, I. *et al.* Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 109, p. 314-327, 2007.
- OLDONI, H.; BASSOI, L. H. Delineation of irrigation management zones in a Quartzipsamment of the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 51, p. 1283-1294, 2016.
- OLDONI, H. *et al.* Apparent soil electrical conductivity as a guidance for canopy management in vineyards. In: *5th Global Workshop on Proximal Soil Sensing*, 2019, Columbia. PSS 2019. Columbia: USDA ARS / University of Missouri, 2019. p. 105-110.
- OLDONI, H. *et al.* Delineamento de zonas de manejo de irrigação em vinhedo com base na granulometria do solo. In: *Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão*, 2018, Curitiba. Construção dos dados na era da digitalização agrícola. Curitiba: AsBraAP, 2018. p. 52-58.
- PIVOTO, D. *et al.* Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. *Information Processing in Agriculture*, 2017.
- QUEIRÓS, L. R. *et al.* Análise das possibilidades e tendências do uso das tecnologias da informação e comunicação em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 97-108.
- RABELLO, L. M.; BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Condutividade elétrica aparente do solo. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 48-57.
- SANTI, A. L. *et al.* Distribuição espaço-temporal de lagartas desfolhadoras e sua correlação com o rendimento de grãos na cultura da soja. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 260-266.
- SANTOS, K. E. L. *et al.* Geoestatística e geoprocessamento na tomada de decisão do uso de insumos em uma pastagem. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 11, n. 3, p. 294-307, 2017.

SCHRAMMEL, B. M.; GEBLER, L. Utilização de ferramentas do SIG para agricultura de precisão no planejamento ambiental de uma pequena propriedade rural produtora de maçãs. *In: INAMASU, R. Y. et al. (org.). Agricultura de Precisão: Um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011, p. 222-226.*

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, v. 27, p. 171-197, 2003.

SHIRATSUCHI, L. S. *et al.* Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. *In: BERNARDI, A. C. C. et al. (org.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. p. 58-73.*

SØRENSEN, C. G. *et al.* Conceptual model of a future farm management information system. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 72, n. 1, p. 37-47, 2010.

SUNDMAEKER, H. *et al.* Internet of food and farm 2020. *In: VERMESAN, O., FRIESS, P. (org.). Digitising the industry: internet of things connecting physical, digital and virtual worlds. Gistrups: River Publishers, 2016. p. 129-151.*

TILMAN, D. *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, v. 418, p. 671-677, 2002.

VERRUMA, A. A. *et al.* Soil and weed occurrence mapping and estimates of sugarcane production cost. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 11, n. 1, p. 68-78, 2017.

WOLFERT, J.; SØRENSEN, C. G.; GOENSE, D. A future internet collaboration platform for safe and healthy food from farm to fork. *Annual SRII Global Conference, 2014. Proceedings... San Jose, CA, USA: SRII p. 266-273, 2014.*

WOLFERT, S., *et al.* Big data in smart farming – a review. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 69-80, 2017.