

FERRAMENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO COMO AUXÍLIO AO MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO

Alberto C. de Campos Bernardi¹

Giovana Maranhão Bettiol²

Célia Regina Grego³

Ricardo Guimarães Andrade⁴

Ladislau Marcelino Rabello⁵

Ricardo Yassushi Inamasu⁶

A maioria dos solos do Brasil são muito intemperizados, ácidos, com baixa capacidade de troca de cátions (CTC), alto poder de fixação de fósforo, elevada acidez trocável (Al^{3+}) e apresentam baixos teores de macronutrientes primários (N, P e K), secundários (Ca, Mg e S) e de micronutrientes (B, Zn e Cu) (BERNARDI et al., 2002). Com relação às limitações físicas, há problemas com baixa disponibilidade de água e alto risco de erosão. A produtividade das forragens depende da interação dos fatores do solo, da planta e do clima. Esses fatores podem ser modificados na busca do aumento da produtividade e do controle no manejo da produção. De modo geral, a correção das características naturais do solo, que limitam o crescimento, o desenvolvimento e a produção da planta, assim como o fornecimento adequado de nutrientes, correspondem

¹ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. alberto.bernardi@embrapa.br

² Geógrafa, analista em Geoprocessamento da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. giovana.bettiol@embrapa.br

³ Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas, SP. celia.grego@embrapa.br

⁴ Engenheiro agrícola, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG. ricardo.andrade@embrapa.br

⁵ Engenheiro elétrico, doutor em Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP. ladislau.rabello@embrapa.br

⁶ Engenheiro mecânico, doutor em Engenharia Mecânica, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP. ricardo.inamasu@embrapa.br

a cerca de 50% de aumento da produtividade. Os 50% restantes são obtidos utilizando forrageiras com maior potencial produtivo e alta capacidade de adaptação a condições adversas, além de outras práticas agrícolas. O Brasil tem grande potencial para contribuir para aumentar a oferta de alimentos no mundo e, também, para atender à crescente demanda interna de sua população. Isso pode ser alcançado pelo aumento da produção agrícola, seja pelo aumento de produtividade, seja pela expansão da área plantada. Durante os últimos 30 anos, a produção de grãos no Brasil cresceu a uma taxa de 4,6% ao ano, enquanto a área plantada cresceu apenas 1,7% ao ano (MARTHA JÚNIOR et al., 2010). Essa diferença é explicada pelo aumento da produtividade, em grande parte devido ao uso racional de fertilizantes. Esses aumentos de produtividade agrícola no Brasil se basearam na inovação tecnológica, e, assim, um fluxo contínuo de conhecimentos técnicos é uma condição necessária para a sustentabilidade do setor.

Por isso, a adequada gestão dos sistemas de produção agropecuários deve ter como base o fornecimento balanceado de nutrientes, de forma a suprir as necessidades das culturas e atender os rendimentos esperados (STEWART et al., 2005). Dessa forma, o uso adequado de fertilizantes se tornou prática indispensável na luta mundial de combate à fome e subnutrição, promovendo o aumento de produtividade agrícola e protegendo e preservando a flora e fauna nativas (CAKMAK, 2002). Os fertilizantes são um dos mais importantes insumos na agricultura moderna (TISDALE et al., 1985).

Heffer e Prud'homme (2012) preveem que o consumo mundial de N, P e K em 2016/2017 deverá alcançar, respectivamente, 114 milhões, 45 milhões e 33 milhões de toneladas, com taxa de crescimento anual de 1,8%. De acordo com a FAO, a demanda por fertilizantes N, P₂O₅ e K₂O na América Latina deverá manter o padrão de crescimento até 2018 com taxas anuais, respectivamente, de 3,3%; 3,6%; e 3,0% (FAO, 2015). A maior parte desse consumo ocorre no Brasil, que é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, e, nas últimas décadas, o consumo tem crescido em média cerca de 6% ao ano (ANDA, 2014). A evolução da utilização desse insumo indica a crescente dependência das importações, uma vez que o consumo cresceu mais rapidamente que a produção nacional, tendo levado o País a importar mais de 70% do fertilizante consumido (ANDA, 2014). Cunha et al. (2014) mostraram um balanço de nutrientes positivo na agricultura brasileira de 2009 a 2012, uma vez que as quantidades de fertilizantes N, P₂O₅ e K₂O aplicados

(respectivamente, 11,3 milhões; 13,9 milhões; e 15,2 milhões de toneladas) foram maiores que as quantidades exportadas (7,4 milhões; 7,4 milhões; e 12,4 milhões de toneladas, respectivamente). As culturas da soja e do milho são responsáveis pelo consumo de 50% dos fertilizantes no Brasil (CUNHA et al., 2014, ANDA, 2014). Os grãos são seguidos pela cana-de-açúcar, café, algodão, arroz, feijão e reflorestamento.

No entanto, a eficiência do uso desses insumos muitas vezes é muito baixa, sendo menos de 50% para o nitrogênio, menos de 100% para o fósforo e aproximadamente 40% para o potássio (BALIGAR et al., 2001). Fole et al. (2011) destacaram que o suprimento insuficiente de nutrientes era o maior problema agrônômico em várias regiões. Por outro lado, o excesso de nutrientes tem causado problemas ambientais em outras regiões do mundo.

Diferentes estratégias podem ser implementadas para aumentar a eficiência do uso de nutrientes para maximizar os benefícios para o sistema planta-solo-atmosfera. Em geral, algumas mudanças no manejo agrícola podem aumentar a eficiência do uso dos nutrientes, tais como: a diminuição de limitações – física, química ou biológica – para o crescimento das plantas; adubações equilibradas; fornecimento adequado de água; ajuste do fornecimento de fertilizantes à demanda das plantas; otimização da dose e época de fornecimento de nutrientes; adubações parceladas; uso de rotação de culturas; e uso de fontes mais eficientes (CHIEN et al., 2009).

Na ausência de informações detalhadas, e visando a incrementos adicionais de produtividade, muitos produtores ainda realizam a correção do solo e adubação de suas lavouras, sem maiores critérios na definição de localização, dosagens e época de aplicação dos fertilizantes. A grande maioria ainda utiliza formulações de nutrientes e quantidades fixas, prática que pode, ao longo do tempo, favorecer o desbalanço no fornecimento desses nutrientes, uma vez que essas adubações podem estar sendo realizadas de forma sub ou superdimensionadas. As ferramentas de agricultura de precisão podem auxiliar na obtenção dessas informações. Este texto tem como objetivo apresentar as ferramentas de agricultura de precisão e discutir como elas podem auxiliar no manejo da fertilidade do solo e melhoria da eficiência de uso de nutrientes.

AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura de precisão (AP) pode ainda ser definida como o uso de práticas agrícolas com base nas tecnologias de informação para o tratamento da variabilidade espacial. E 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 (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010).

O primeiro mapa de produtividade derivado de um monitor de rendimento acoplado ao GPS foi produzido na Alemanha, em 1990, a partir de uma cultura de canola (SCHNUG et al., 1991). Desde então, a agricultura de precisão tornou-se acessível aos produtores, com o surgimento de vários equipamentos e tecnologias. Os produtores de grãos e algodão dos EUA dominaram as tecnologias e expandiram as atividades com a AP. De acordo com Griffin e Lowenberg-DeBoer (2005), no início da década de 2000, cerca de 90% dos monitores de produtividade do mundo estavam em operação nos EUA. Em cerca de 28% da área de milho plantada e 22% da área plantada de soja, o rendimento era monitorado com esses equipamentos (WINSTEAD et al., 2010). Os principais fatores para a adoção das tecnologias de AP nos EUA foram o aumento da eficiência dos sistemas de produção, com a otimização dos custos por meio da aplicação de fertilizantes à taxa variável (DOERGE 2005; GODWIN et al 2003) e a maximização do rendimento (KITCHEN, 2008). Na Europa, o motivo para o grande interesse para a adoção da AP foi o potencial como ferramenta para minimizar os efeitos ambientais negativos da produção agrícola (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004; STOOORVOGEL; BOUMA, 2005), e também para o rastreamento do produto (McBRATNEY et al., 2005). Para Gebbers e Adamchuk (2010), é também um dos meios para se alcançar a segurança alimentar.

Com o início do uso da AP no Brasil, na segunda metade da década de 1990, inadvertidamente criou-se uma forte imagem de que esta seria uma agricultura realizada com máquinas sofisticadas, que não atenderia aos pequenos produtores (INAMASU; BERNARDI, 2014). Isso, de certa forma, limitou a adoção, pois a AP ainda não era compreendida como uma alternativa para alcançar a sustentabilidade dos sistemas agropecuários. A análise conduzida por Griffin e Lowenberg-DeBoer (2005) confirmou que a adoção da PA no Brasil estava ocorrendo de forma lenta e desigual,

em ritmo inferior ao da expansão da produção. Segundo os autores, entre os fatores que contribuíam para esse atraso na adoção da tecnologia estavam os preços relativamente baixos da terra, baixo custo da mão de obra, pouco uso de informática nas propriedades rurais e o custo elevado dos equipamentos importados de alta tecnologia. Mais recentemente, o conceito da AP como uma postura gerencial que leva em conta a variabilidade espacial da lavoura para obter retorno econômico e ambiental (INAMASU et al., 2011) foi mais bem compreendido, reforçando a visão de cadeia de conhecimentos, na qual máquinas, aplicativos e equipamentos são ferramentas que podem apoiar essa gestão (INAMASU; BERNARDI, 2014). Para a consolidação desse conceito, têm sido endereçados esforços de divulgação da AP, como relataram Bernardi et al. (2015).

Os resultados do levantamento recente apresentado por Bernardi e Inamasu (2014) mostraram que as principais culturas nas quais tem sido utilizada a AP são milho e soja, e o perfil dos proprietários e administradores de propriedades que adotam a AP é: jovem, instruído, propenso a utilizar mais tecnologias e informática e cultiva grandes extensões de terras. Também mostraram que, apesar de os avanços terem ocorrido especialmente nas culturas anuais, a variabilidade ocorre também nas culturas semiperenes (GREGO et al., 2014a), perenes (BASSOI et al., 2014) e sistemas pecuários (BERNARDI; PEREZ, 2014), e que é possível mensurar a variabilidade espacial nesses sistemas e intervir de forma a aumentar a eficiência.

Variabilidade espacial

A aplicação do objeto da geoestatística na agricultura de precisão 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. Com base nos modelos ajustados dos semivariogramas, interpolam-se os dados pela técnica da krigagem, gerando vários mapas ou superfícies (GREGO et al., 2014b; VIEIRA, 2000). A interpolação dos mapas pode ser realizada por diversas técnicas ou métodos, os quais criam mapas de probabilidade, uma vez que essas superfícies são valores preditos e erros. O método da krigagem estima valores desconhecidos utilizando os semivariogramas, que são os modelos da variação dos dados em função da distância (GREGO et al., 2014b). Existem diversos outros métodos de interpolação, que diferenciam-se da krigagem, por desconsiderarem o quanto as variações das distâncias

influenciam no comportamento dos dados. Esses outros métodos de interpolação são os que mais têm sido utilizados comercialmente para gerar os mapas de prescrição de corretivos e fertilizantes.

O conjunto de geoprocessamento, ou geotecnologias – que incluem as tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação com referência geográfica –, tem grande potencial para gestão da produção agrícola e pecuária (BATISTELLA et al., 2011; FILIPPINI ALBA, 2014). 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).

O potencial produtivo das culturas é determinado pelos fatores edafoclimáticos e também pela espécie e/ou cultivar. O solo pode influenciar o crescimento vegetal pelo fornecimento de água, nutrientes e oxigênio. 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, etc. (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. A análise química da terra é um dos recursos mais usados no Brasil para avaliação da fertilidade do solo. Por meio de extratores químicos, procura-se determinar o grau de suficiência ou de deficiência dos elementos no solo, além de quantificar condições adversas que possam prejudicar o desenvolvimento das plantas (RAIJ, 1991). Bernardi e Inamasu (2014) confirmam que a grande maioria (93%) dos produtores que adotam a AP utiliza essa ferramenta.

Atualmente, a amostragem de solo em grades georreferenciadas, o mapeamento das propriedades do solo e a aplicação de corretivos e fertilizantes em taxas variáveis são as tecnologias de AP mais utilizadas pelos produtores (BERNARDI; INAMASU, 2014). Resende et al. (2014) relataram o grande crescimento na utilização de amostragens georreferenciadas para mapeamento da fertilidade do solo e distribuição de corretivos e fertilizantes em taxa variável que tem havido no Brasil nos últimos 5 anos.

O reconhecimento de padrões em propriedades de solo e planta é etapa inicial para a divisão das lavouras em zonas ou classes de manejo (SANTOS et al., 2003). Luchiari et al. (2001) mostraram que a divisão de uma área em subáreas homogêneas, denominadas zonas de manejo, pode ser eficiente para definir a dinâmica de uma lavoura e a aplicação localizada de insumos. Uma das formas para a definição dessas zonas de manejo pode ser feita por meio dos mapas de produtividade (MOLIN, 2002). Esses mapas são a informação mais completa para visualizar a variabilidade espacial das lavouras em relação aos fatores de produção. O mapeamento da produtividade também está muito difundido para a cultura de grãos (em especial milho e soja), pois as colhedoras já vêm equipadas com monitores de colheita que possibilitam realizar esses mapas (BERNARDI; INAMASU, 2014). No entanto, o emprego do mapeamento de produtividade é ainda muito baixo nas principais regiões produtoras do País, principalmente se comparado com o uso nos Estados Unidos e Argentina (RESENDE et al., 2014).

Mas o conhecimento das causas da variabilidade da produção é que subsidiará as decisões sobre o manejo do solo e da cultura (AMADO et al., 2007; MILANI et al., 2006; MOLIN, 2002). A grade de amostragem é fundamental para a avaliação da variabilidade espacial dos atributos dos solos e para estabelecer um programa de recomendação de correção e adubação do solo utilizando as ferramentas de AP. No entanto, a determinação do espaçamento ideal de uma grade amostral tem sido uma das grandes dificuldades nos estudos da variabilidade espacial das propriedades dos solos (LARK, 2002). O tamanho da grade amostral está relacionado com a acurácia da amostragem, e também com o custo. Bernardi e Inamasu (2014) mostraram que a maioria dos adotantes de AP no Brasil utilizam grades com uma amostra coletada a cada 3 ha a 5 ha. Em muitas situações, essa amostragem em grade na quantidade realizada atualmente não é suficiente para obter um mapa com qualidade para aplicação de fertilizantes; entretanto, é preferível ter uma amostra a cada 5 hectares a ter uma a cada 20 hectares, por exemplo.

Resende et al. (2014) estimaram que entre 3 milhões e 4 milhões de hectares de lavouras anuais e cerca de 1,5 milhão de hectares de cana-de-açúcar estavam sendo trabalhados com tecnologias de AP para mapeamento da fertilidade e aplicação de corretivos e fertilizantes a taxa variável.

Uso de sensores em AP

Para verificar a variabilidade espacial, muitas vezes a amostragem mais intensa é necessária, dessa forma aumentando muito os pontos de amostragem. Nessas circunstâncias, o uso de ferramentas de AP pode contribuir para automação da avaliação, de modo a otimizar o tempo e mão de obra, e manter a confiabilidade da estimativa. Por isso, a AP requer ferramentas para avaliar a variabilidade espacial do solo e das culturas que possibilitem a redução das amostragens intensivas e caras (MCBRATNEY; PRINGLE, 1999). Isso tem levado ao surgimento de uma série de propostas e sistemas de sensoriamento e monitoramento, que têm como objetivo a medida indireta de propriedades do solo ou das culturas com base em sistemas ópticos, eletromagnéticos, eletroquímicos, mecânicos, de fluxo de ar e acústicos (ADAMCHUK et al., 2004). Por isso, o uso de sensores para propriedades do solo ou parâmetros biofísicos vegetais tem encontrado cada vez mais aplicações nos sistemas de produção agropecuários (BERNARDI et al., 2014a, 2014b; BERNARDI; PEREZ, 2014).

Os índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizados para estimar a biomassa vegetal, uma vez que fornecem padrões temporais e espaciais das mudanças nos ecossistemas e têm sido úteis na estimativa de parâmetros biofísicos (SHIRATSUCHI et al., 2014). A mensuração da reflectância espectral é a abordagem sem contato e não destrutiva mais promissora para a determinação da deficiência de nitrogênio e estimativa da biomassa das culturas.

A condutividade elétrica aparente (CEa) do solo é uma medida que integra textura e disponibilidade de água, duas características do solo que afetam a produtividade, pode auxiliar na interpretação das variações de rendimento das culturas (RABELLO et al., 2014) e foi relacionada com a variabilidade espacial da produção das culturas (LUCHIARI et al., 2001). 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, e a medição desses valores foi útil para o estabelecimento dos limites de zonas de manejo em lavoura de soja.

Porém, existem grandes diferenças na densidade de pontos possíveis nas amostragens tradicionais de solo, ou com o uso de sensores de medida

direta, seja de propriedades do solo, (como a CEa) seja de índices de vegetação, obtidos com sensoriamento remoto. A Figura 1 ilustra essas diferenças, e mostra que com um sensor de CEa foi possível cobrir de forma muito mais detalhada a área de estudo. Dessa forma, a opção de manejo dessa área poderia ser o mapeamento do solo, com esse tipo de sensor, o estabelecimento de zonas de manejo, com base nesses resultados associados aos índices de vegetação, e então a amostragem de solos nas regiões delimitadas.

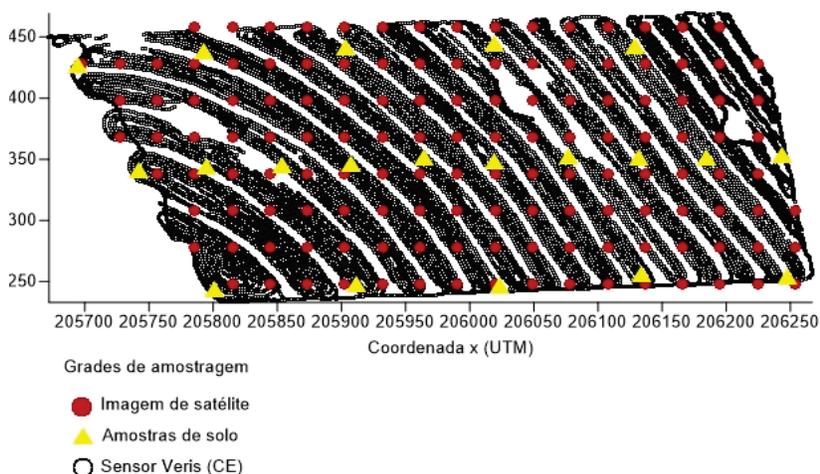


Figura 1. Representação dos pontos de coleta de dados utilizando-se um sensor de condutividade elétrica do solo (Veris), imagens de satélite e amostragem de solo.

Fonte: adaptada de Bernardi et al. (2014a).

Recomendação de adubação e calagem usando ferramentas de AP

A tecnologia de aplicação em taxa variável de insumos, também conhecida pelo termo em inglês *Variable Rate Technology* (VRT), é realizada a partir de amostras de solo georreferenciadas coletadas nas grades de amostragem, que, após a análise geoestatística, serve de base para a elaboração dos mapas de fertilidade do solo (BERNARDI et al., 2004). Com base nos mapas de atributos químicos (P, CTC, e saturação por bases, por

exemplo), são elaborados mapas de prescrição de fornecimento de corretivos e fertilizantes em quantidades distintas para diferentes partes do talhão, de acordo com a mudança na condição de fertilidade de um local para outro dentro da área em questão (RESENDE et al., 2014).

Com base nos dados de Bernardi et al. (2014b), elaborou-se a Figura 2A, com um exemplo da recomendação de adubação com fósforo para uma pastagem de alfafa em um sistema de produção, considerando-se a variabilidade espacial. O mapa de aplicação foi elaborado por krigagem dos pontos georreferenciados de resultados de análise do solo, e estes indicaram que existem áreas em que a necessidade de fertilizantes fosfatados (super simples) variava de menos de 300 kg ha⁻¹ até cerca de 800 kg ha⁻¹. Os efeitos dessas diferenças nas quantidades necessárias de fertilizantes podem ser observados no custo de produção do sistema (Figura 2B).

A análise da sustentabilidade de qualquer sistema tem de considerar tanto os aspectos agrônômicos quanto os ambientais e os econômicos. Griffin e Lowenberg-DeBoer (2005) indicaram que em 68% dos casos analisados, os sistemas com uso da AP foram mais rentáveis que os sistemas de cultivo convencional. No trabalho de Bernardi et al. (2014b), foram realizadas estimativas do custo de produção de um sistema de leite que utilizava pastagem de alfafa. No mesmo trabalho, com base nas estimativas de produção de leite por região (Figura 2C), foi possível estimar também a receita (Figura 2D). Com base no custo e na receita, os autores mostraram as diferenças no retorno econômico do sistema (Figura E), considerando a variabilidade espacial.

Já existem máquinas e equipamentos nacionais com mecanismos de regulação e controladores de fluxo de sementes e insumos, e com sensores de desempenho de aplicadores de insumos, os quais possibilitam variar automaticamente a aplicação de insumos de acordo com os mapas de prescrição (RESENDE et al., 2014).

Perspectivas futuras

Apesar dos avanços alcançados com a AP, existem ainda lacunas para pesquisa e desenvolvimento que devem ser contornadas. É necessário estimular e ampliar a pesquisa, desenvolvimento e inovação das tecnologias

nacionais de AP, e também os processos de validação de tecnologias importadas e adaptação destas aos sistemas de cultivo brasileiros.

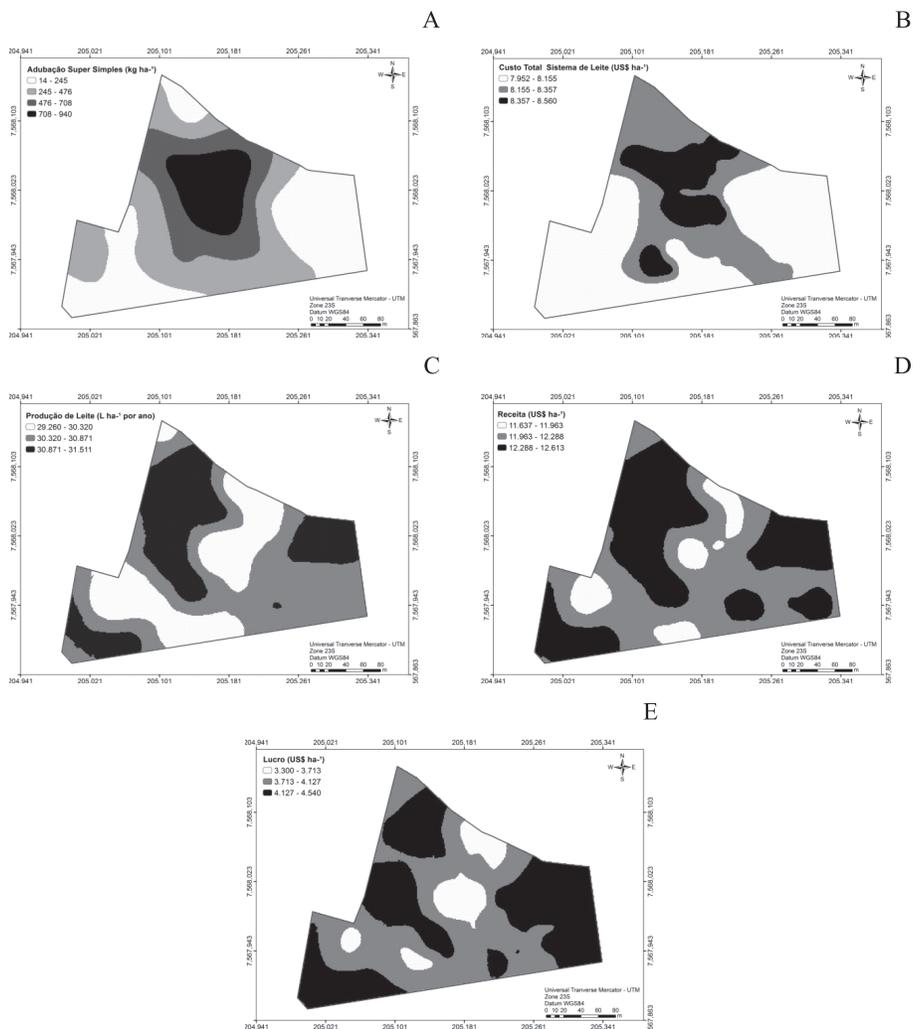


Figura 2. Recomendação espacializada da adubação com fósforo (A), custo de produção (B), e estimativas da produção de leite espacializada (C), da receita (D) e do lucro (E) de um sistema de produção de leite utilizando-se pastagem de alfafa.

Fonte: adaptado de Bernardi et al. (2014b).

Necessita-se avançar ainda na questão da amostragem de solo. As grades de amostragem fixas e padronizadas, além de mais caras e laboriosas, podem não fornecer as informações necessárias. O uso de sensores pode ajudar a delimitar regiões (ou zonas de manejo) e, com base nesses limites, estabelecer pontos de amostragem mais direcionados. A associação dos conhecimentos pedológicos também deve ser utilizada para direcionar a amostragem do solo. Existem equipamentos disponíveis no mercado para aplicação de corretivos e fertilizantes a taxa variável, no entanto, ainda faltam técnicos e operadores capacitados para o planejamento e aplicação desses insumos. A transferência de conhecimentos de AP tem que ser intensificada, em diferentes formas, como publicações técnicas, cursos, palestras, dias de campo, matérias jornalísticas e outras mais.

Para que os avanços da AP no manejo dos sistemas produtivos sejam consistentes, será necessário que sejam feitas avaliações a médio e longo prazo dos efeitos das aplicações de insumos a taxa variável na variabilidade espacial e temporal do solo e na produtividade das culturas.

Além da correção e adubação a taxas variáveis, a prática da AP no Brasil deverá integrar outros aspectos relacionados ao: i) manejo e conservação de solos, considerando-se variações de relevo e material de origem; ii) qualidade do solo, envolvendo os aspectos relacionados aos atributos físicos (com destaque para estrutura do solo, compactação e disponibilidade hídrica) e biológicos, uma vez que os químicos já vêm sendo estudados; iii) quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo; e iv) práticas de manejo relacionadas ao controle de plantas daninhas, pragas e doenças, rotação de culturas e formação de cobertura do solo.

CONCLUSÕES

No geral, a produção agrícola brasileira depende do uso de corretivos do solo e do fornecimento de nutrientes por meio das adubações minerais e/ou orgânicas. As baixas taxas de eficiência de utilização de nutrientes precisam ser melhoradas. Os resultados apresentados indicaram que a AP é um conjunto de ferramentas úteis para o entendimento da variabilidade espacial e fornecimento de informações para intervenção nas práticas de manejo. A AP pode auxiliar na melhoria da eficiência de uso de nutrientes. A implementação

das práticas de manejo, com base nas ferramentas de AP, poderá melhorar o retorno econômico dos sistemas agropecuários.

AGRADECIMENTOS

Ao Potash International Institute, pelo apoio na realização das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, p. 71-91, 2004.
- AMADO, T. J. C.; PONTELLI, C. B.; SANTI, A. L.; VIANA, J. H. M.; SULZBACH, L. A. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1101-1110, 2007.
- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**: 2013. São Paulo, 2014. 176 p. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/estatisticas.aspx>>. Acesso em: 1º jun. 2015.
- BALIGAR, V. C.; FAGÉRIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 37, p. 921-950, 2001.
- BASSOI, L. H.; MIELE, A.; REISSER JUNIOR, C.; GEBLER, L.; FLORES, C. A.; FILIPPINI ALBA, J. M.; GREGO, C. R.; TERRA, V. S. S.; TIMM, L. C.; NASCIMENTO, P. dos S. Agricultura de precisão em fruticultura. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 350-360.
- BATISTELLA, M.; ANDRADE, R. G.; BOLFE, É. L.; VICTORIA, D. C.; SILVA, G. B. S. Geotecnologias e gestão territorial da bovinocultura no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 251-260, 2011.
- BERNARDI, A. C. C.; ANDRADE, R. G.; GREGO, C. R.; INAMASU, R. Y.; RABELLO, L. M. Variabilidade espacial de parâmetros físico-químicas do solo e biofísicos de superfície em cultivo do sorgo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 623-630, 2014a.
- 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 an alfalfa pasture under grazing in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

PRECISION AGRICULTURE, 12., 2014, Sacramento. **Abstracts...** New York: ISPA, 2014b. 1 CD-ROM.

BERNARDI, A. C. C.; FRAGALLE, C. V. P.; FRAGALLE, E. P.; SILVA, J. C.; INAMASU, R. Y. Estratégias de comunicação em agricultura de precisão. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 20, p. 189-200, 2015.

BERNARDI, A. C. C.; GIMENEZ, L. M.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Org.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 153-164

BERNARDI, A. C. 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. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 559-577.

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A., SILVA, C. A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C. M.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2002. p. 61-77.

BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 492-499.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, v. 4, p. 359-387, 2004.

CAKMAK, I. Plant nutrition research: priorities to meet human needs for food in sustainable ways. **Plant and Soil**, v. 247, p. 3-24, 2002.

CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v. 1, n. 1, p.-14, 1999.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, Madison, v. 102, p. 267-322, 2009.

CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura Brasileira. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 145, p. 1-13, 2014.

DOERGE T. A. Nitrogen measurement for variable-rate N management in maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, p. 23-32, 2005.

FAO. **Current world fertilizer trends and outlook to 2018**. FAO: Rome, 2015. 53 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf>>. Acesso em: 1º maio 2015.

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. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 84-95.

FOLE, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTROM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, n. 478, p. 337-342, 2011.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-31, 2010.

GODWIN, R. J.; RICHARDS, T. E.; WOOD, G. A.; WELSH, J. P.; KNIGHT, S. M. An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production. **Biosystems Engineering**, v. 84, p. 533-545, 2003.

GREGO, C. R.; ARAUJO, L. S.; VICENTE, L. E.; NOGUEIRA, S. F.; MAGALHÃES, P. S. G.; VICENTE, A. K.; BRANCALIÃO, S. R.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Agricultura de precisão em cana-de-açúcar. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014a. p. 442-457.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014b. cap. 5, p. 74-83.

GRIFFIN, T. W.; LOWENBERG-DEBOER, J. Worldwide adoption and profitability of precision agriculture: implications for Brazil. **Revista de Política Agrícola**, v. 14, p. 20-38, 2005.

HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. **Fertilizer Outlook: 2012-2016**. Paris: IFA, 2012. Disponível em: <http://www.fertilizer.org/imis20/images/Library_Downloads/2012_doha_ifa_summary.pdf?WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306e=404%3bhttp%3a%2f%2fwww.fertilizer.org%3a80%2fen%2fimages%2fLibrary_Downloads%2f2012_doha_ifa_summary.pdf>. Acesso em: 1º jun. 2015.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; QUEIROS, L. R.; RESENDE, A. V.; VILELA, M. de F.; JORGE, L. A. C.; BASSOI, L. H.; PEREZ, N. B.; FRAGALLE, E. P. Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 14-26.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.).

Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33.

KITCHEN, N. R. Emerging technologies for real-time and integrated agriculture decisions. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 61, p. 1-3, 2008.

LARK, R. M. Optimized spatial sampling of soil for estimation of the variogram by maximum likelihood. **Geoderma**, v. 105, p. 49-80, 2002.

LUCHIARI, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, A.; PAYTON S. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management [CD-ROM]. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER PRECISION RESOURCES MANAGEMENT*, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2001. Editores, P. C. Robert, R. H. Rust e W. E. Larson.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; ALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G. A.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. M. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1023-1031, 2006.

MARTHA JÚNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E.; RAMOS, S. Y. Estilo de desenvolvimento da agropecuária brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 19, p. 93-106, 2010.

McBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, New York, v. 6, p. 7-23, 2005.

McBRATNEY, A. B.; PRINGLE, M. J. estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 219-236, 1999.

MILANI, L.; SOUZA, E.G. de; URIBE-OPAZO, M.A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J. A.; PEREIRA, J. O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, p. 591-598, 2006.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, p. 83-92, 2002.

RABELLO, L. M.; BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Condutividade elétrica aparente do solo. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 48-57.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafos: Ceres, 1991.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. de F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. Agricultura de precisão no Brasil: avanços e impactos no manejo e na conservação do solo, na sustentabilidade e na segurança alimentar. In: LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.;

- ARAÚJO, A. S. F. (Ed.). **Agricultura conservacionista no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 468-488
- SANTOS, A. O.; PALLONE FILHO, W. J.; UNGARO, M. R. G.; LINO, A. C. L.; RADIN, B. Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-climal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 463-468, 2003.
- SCHNUG, E.; HANEKLAUS, S.; LAMP, J. Continuous large scale yield mapping in oilseed rape fields and application of yield maps to CAF. **Oilseeds**, v. 9, p. 13-14, 1991.
- SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDAO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 58-73.
- STEWART, W. M.; DIBB, D. W.; JOHNSTON, A. E.; SMYTH, T. J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 1-6, 2005.
- STOORVOGEL, J.; BOUMA, J. Precision agriculture: The solution to control nutrient emissions? In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2005, **Proceedings...** Wageningen: Academic Publishers, 2005. p. 47-55. Editor, J. V. Stafford.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers**. 4th ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1985.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.
- WINSTEAD, A. T.; NORWOOD, S. H.; GRIFFIN, T. W.; RUNGE, M.; ADRIAN, A. M.; FULTON, J. P.; KELTON, J. Adoption and use of precision agriculture technologies by practitioners. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. **Proceedings...** Denver: ISPA, 2010. 1 CD-ROM, p. 18-21.

Trabalho recebido em 15 de junho de 2015 e aceito em 16 de dezembro de 2015