

Adubação à taxa variável e uso eficiente de nutrientes em pastagens

Variable rate fertilization and efficient use of nutrients in pastures

Alberto Carlos de Campos Bernardi¹

¹ Engenheiro Agrônomo, Dr., Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br

RESUMO

A agricultura de precisão (AP) é a alternativa para o manejo eficiente na propriedade, tendo como base a detecção, mapeamento, interpretação e estabelecimento de estratégias de manejo considerando a variabilidade temporal e espacial das propriedades do solo e das culturas para maximizar o retorno econômico e minimizar os riscos de danos ao meio ambiente. O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para o uso racional de insumos, como na aplicação a taxa variável de calcário e fertilizantes. O manejo intensivo de pastagens integra diferentes tecnologias, como calagem e adubação do solo e pastejo rotacionado. Considerando que o calcário e os fertilizantes são fatores críticos para a intensificação dos sistemas de pastagens, a AP é o conjunto de ferramentas para melhorar a eficiência do uso desses insumos. O fornecimento de fertilizantes é um dos principais custos de manutenção da pastagem permanente. Os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos devem ser considerados na análise da sustentabilidade de um sistema de produção. Este capítulo discutirá a variabilidade espacial das propriedades do solo e aplicação de calagem e fertilizantes em uma taxa variável e análise econômica de sistemas de pastagens manejadas intensivamente. Os resultados mostraram que a análise espacial das necessidades de calagem e adubação podem fornecer ferramentas de gestão para o manejo de pastagens. E a tecnologia da aplicação de calcário e fertilizante fosfatado à taxa variável pode ser utilizada como ferramenta de correção e adubação do solo levando à maior homogeneidade dos atributos químicos do solo e contribuindo para melhor retorno econômico do sistema de produção.

Palavras-chave: análise de solo; geoprocessamento; taxa variável; calagem; adubação fosfática; análise econômica.

ABSTRACT

Precision Agriculture (PA) is the way to achieve efficient farm management based on detection, mapping, interpretation, and establishing management strategies based on crop and soil space and temporal variability to maximize economic returns and minimize environmental damage risks. Knowledge of spatial variability of soil properties helps the rational use of inputs, as in the site-specific application of lime and fertilizer. Intensive pasture management integrates technologies such as soil liming and fertilization, irrigation, and rotational grazing. Since lime and fertilizer are critical factors for the intensification of pasture systems, precision agriculture (PA) is the tool to improve the efficiency of these issues. Fertilizer supply is the main cost of maintenance of permanent pastures. Therefore, the agronomic, environmental, and economic aspects should be considered in the analysis of the sustainability of a production system. This chapter will discuss the spatial variability of soil properties, liming and fertilizer application at a variable rate, and economic analysis of intensively managed pasture systems. The results showed that spatial analysis of liming and fertilization needs could provide management tools for pasture management. Furthermore, variable rate lime and phosphate fertilizer application technology can be used as a soil correction and fertilization tool, leading to greater homogeneity of soil chemical attributes and a better economic return of the production system.

Keywords: soil testing; geoprocessing; variable rate; lime; phosphorus fertilizer; economic analysis.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000067>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

As pastagens são um importante ecossistema terrestre, representando cerca de um terço da superfície terrestre da Terra, e possuem funções de proteção ecológica extremamente importantes como conservação do solo e da água, fixação de carbono e liberação de oxigênio, preservação da biodiversidade, além de ser uma importante fonte de alimentos, fibras e energia (Lopez et al., 2022). No Brasil estima-se que a área total de pastagens seja de 166 milhões de ha, e que cerca de 16% (ou 25,7 milhões ha) estão altamente degradados, e outros 39% (63,3 milhões ha) estão moderadamente degradados (Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento, 2020) apresentando baixa produtividade. Por esse levantamento existem cerca de 74,7 milhões de ha (ou 45% da área total) com pastagens em condições adequadas, que podem garantir adequadas produtividades.

Aqui no Brasil, os sistemas predominantes de produção de gado de corte e leite são baseados principalmente em pastejo de pastagens nativas e cultivadas, que são mantidas em lotação contínua, ou rotacionada durante todo o ano, e é a principal fonte de alimentação animal. Cerca de 90% dos nutrientes requeridos pelos ruminantes são obtidos diretamente do pastejo (Euclides et al., 2010).

Um dos principais problemas das pastagens no Brasil apontado por técnicos e produtores é a baixa fertilidade do solo, sendo o ajuste da taxa de lotação e fornecimento de corretivos e fertilizantes as principais soluções utilizadas pelos produtores (Santos; Euclides, 2022).

A intensificação do manejo das pastagens tropicais (Figura 1) é uma estratégia para aumentar a produção de carne e leite (Cardoso et al., 2020). A adoção de estratégias de intensificação da produção pecuária em áreas de pastagens tropicais depende do conhecimento dos produtores sobre solo, recursos hídricos, manejo vegetal e animal e do mercado, e sua implementação envolve diversas técnicas específicas aplicadas em conjunto (Cardoso et al., 2020). Entre as técnicas de intensificação, que permitem aumento das taxas de lotação e da produtividade estão a substituição das espécies de forrageiras por outras mais responsivas e produtivas, pastejo rotacionado, disponibilidade de forragem na estação seca, regulação das taxas de lotação, melhoramento genético do rebanho de bovinos e aumento da fertilidade do solo por meio do fornecimento equilibrado de fertilizantes (Primavesi et al., 1999).

A produtividade da pastagem é determinada por vários fatores como espécie, condições climáticas e de solo e práticas de manejo. Porém, o manejo da fertilidade do solo e do estado nutricional é uma prática que tem grande impacto na produtividade e qualidade das pastagens, longevidade, bem como alta produtividade animal com menores impactos ambientais (Cantarella et al., 2002; Bernardi et al., 20012). As pesquisas em regiões tropicais e subtropicais têm destacado a necessidade de suprir o sistema de pastagem com macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Mo, Mn e Zn), bem como o solo visto que a adubação é um dos fatores que mais contribuem para aumentar a produtividade e a qualidade



Figura 1. Pastagens tropicais manejadas intensivamente.

da matéria seca da forragem (Primavesi et al., 1999; Cantarella et al., 2002; Bernardi et al., 2012). Em geral, o N é o nutriente que mais limita o crescimento das plantas e afeta a produtividade das pastagens (Martha Júnior et al., 2004).

O uso de fertilizantes tem sido tema de preocupação devido ao cenário de alta dependência externa e elevação dos preços. Bernardi e Mantovani (2021) discutiram e apresentaram alternativas para uso das tecnologias digitais como forma de aumento da eficiência do uso de nutrientes.

Este capítulo discutirá a variabilidade espacial das propriedades do solo e aplicação de calagem e fertilizantes em uma taxa variável, assim como a análise econômica de sistemas de pastagens manejadas intensivamente.

2 AGRICULTURA DE PRECISÃO EM PASTAGENS

A agricultura de precisão (AP) pode auxiliar na melhoria da eficiência de uso de fertilizantes, pois o manejo da fertilidade do solo, sem levar em conta a variação espacial dentro das áreas de produção, pode afetar diretamente a produtividade e a qualidade ambiental (Bernardi et al., 2016). Isso porque o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para a aplicação localizada e à taxa variável de calcário e fertilizantes, contribuindo, assim, para o uso racional dos insumos (Bernardi et al., 2015). O manejo intensivo de pastagens integra várias tecnologias como correção do solo e adubação, irrigação e pastejo rotacionado. O uso de calcário e o fertilizante são fatores-chave para a intensificação do manejo de pastagens, a AP é a ferramenta para melhorar a eficiência do uso desses insumos.

As ferramentas de AP têm sido utilizadas com maior frequência nas culturas de grãos, hortícolas, fruteiras e silvicultura, mas há um grande potencial para uso nos sistemas de produção animal baseados no uso de pastagens tropicais para ruminantes (Bernardi; Perez, 2014). O potencial, benefícios e limitações do uso da AP em sistemas de pastagens foi apresentado e discutido por Schellberg et al. (2008).

A utilização de tecnologias digitais pelos pecuaristas tem potencial para aumentar, como indicado por Bolfe et al. (2021) em pesquisa realizada com um grupo selecionado de 334 pecuaristas (que também eram agricultores). No levantamento verificaram que apenas 18% dos entrevistados informaram não fazer uso de nenhuma ferramenta digital. Entre as aplicações estavam a utilização de aplicativos móveis, softwares ou plataformas digitais para obter informações e apoiar a gestão da propriedade (64%); ferramenta di-

gital para gestão da propriedade (45%); sensores remotos (satélites e/ou drones) e sistemas de posicionamento global por satélite (GPS) para monitorar e planejar, mapear e fazer uso da terra na propriedade (34%); aplicativos móveis e/ou plataformas para compra de insumos ou comercialização da produção (40%); aplicação de tecnologia digital em bem-estar animal (30%); previsão climática (25%); e sensores remotos (20%). Estes números indicam que as tecnologias digitais estão se tornando acessíveis e certamente poderão contribuir em vários níveis da produção pecuária nos próximos anos.

O uso de ferramentas de AP, como a amostragem de solo georreferenciada e a aplicação de insumos a taxa variável, tem sido utilizado em áreas piloto na Embrapa Pecuária Sudeste como forma de validar essa tecnologia. Os resultados têm indicado que é possível mapear e avaliar a variabilidade espacial das propriedades do solo e recomendar a calagem e aplicação de fertilizante com base nesses mapas, aumentando a eficiência do uso e otimizando o uso de recursos, aplicando a dose certa, no local certo e na época mais adequada.

A abordagem utilizada nesses estudos baseia-se no ciclo proposto por Gebbers e Adamchuk (2010), que se inicia na i) coleta dos dados (amostragem de solo); ii) análises (químicas e físicas de solo) e interpretação desses dados; iii) geração das recomendações (com base na literatura disponível); iv) geração dos mapas; v) aplicação ou intervenção no campo; e vi) avaliação (agronômica ou econômica) dos resultados.

3 AMOSTRAGEM DE SOLO

O procedimento predominante no Brasil para mapeamento das propriedades do solo envolve a coleta de amostras em grades georreferenciadas, envio destas para análises em laboratórios de fertilidade e, posteriormente, geração dos mapas utilizando métodos de interpolação (Bernardi et al., 2015).

A estratégia de amostragem de solo, por grade regular ou zonas de manejo, é crítica para o gerenciamento preciso da variabilidade espacial das propriedades do solo e das plantas, principalmente para a aplicação de taxas variáveis. O tamanho da grade amostral está relacionado com a acurácia da amostragem e ao custo. Nanni et al. (2011) verificaram que grades de amostragem de solo utilizadas em diversas culturas brasileiras variam de 0,2 a 1 amostra por ha. Bernardi e Inamasu (2014) verificaram que a maioria dos adotantes de AP no Brasil utilizam grades com 1 amostra coletada a cada 3 a 5 ha. Em muitas situações, essa amostragem em grade na quantidade realizada atu-

almente não é suficiente para obter um mapa com qualidade para aplicação de fertilizantes.

Os métodos de amostragem de solo podem ser divididos nas diferentes modalidades descritas a seguir e estão representadas na Figura 2. Na Tabela 1 são discutidas as vantagens e desvantagens de cada método, com a apresentação dos pontos forte e pontos fracos e os conhecimentos necessários na amostragem de solo e na interpretação dos resultados, assim como a possibilidade de erros na intervenção na área, ou na implementação da prática da adubação ou calagem.

- **Tradicional (A)** é realizado com o caminhamento em zigue-zague cobrindo toda parcela.
- **Grade por ponto** com o uso de um sistema de informação geográfica (SIG); são gerados polígonos

regulares, e dentro de cada um há um ponto amostral, que poderá ser **sistemático ou regular (B)**, se estiver no centro, ou **aleatório (C)** se estiver em uma posição aleatória dentro do polígono. Tem sido utilizada a coleta em torno de 8 a 12 subamostras por ponto para a amostragem de solo, que serão homogeneizadas gerando então uma amostra composta e o resultado da análise é atribuído a toda a área da grade.

- **Grade por célula (D)**, a parcela é dividida em subáreas, podendo estas ser regulares ou irregulares, em que cada subárea corresponde a uma célula;
- **Estratificado ou direcionado (E)**, não há uma ordem regular dos pontos da amostragem, que são selecionados com o uso de mapas (por exemplo de

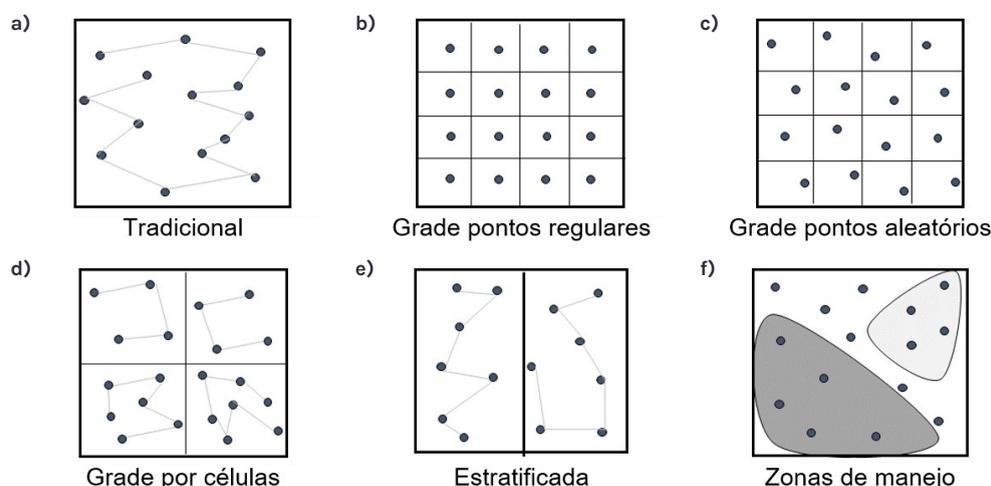


Figura 2. Representação dos métodos de amostragem de solo tradicional (A), em grade com pontos regulares (B) ou aleatórios (C), por células (D), estratificada (E) e por zonas de manejo (F). Elaborado a partir de Colaço & Molin (2014).

Tabela 1. Pontos fortes e fracos dos métodos de amostragem de solo.

Amostragem	Metodologia	Conhecimento necessário		Erros na adubação
		Amostragem	Interpretação	
Tradicional	Boas práticas para coleta de amostras de solo	Médio a alto	Baixo	Alto
Grade - célula	Amostras coletadas aleatoriamente a partir de células predeterminadas	Baixo	Baixo	Médio
Grade - ponto	Ponto georreferenciado, 10 a 15 subamostras coletadas de 2,5 a 3 m do centro do ponto	Baixo	Alto	Baixo a médio
Estratificada (tipo de solo)	Amostras de solo compostas coletadas com base no mapa de solo	Médio a alto	Médio	Médio a alto
Estratificada	Com base no histórico da área	Médio	Baixo	Médio a alto
Zonas de manejo	Amostras de solo coletadas nas zonas de manejo	Médio	Alto	Médio
“Achômetro”	Não fazer amostragem	Baixo	Baixo	Muito alto

Fonte: Adaptado de Clay e Carlson (2016).

produtividade, índices de vegetação, relevo ou textura) já existentes da parcela;

- **Zona de manejo (F)** são regiões delimitadas dentro das parcelas, que apresentam condições semelhantes com base em alguma medida quantitativa como classes de solo, mapas de produtividade, imagens de satélite ou imagens aéreas ou outras medidas (Fridgen et al., 2004; Filippini-Alba; Flores; Bernardi, 2023).

As grades de amostragem fixas e padronizadas, além de mais caras e laboriosas, podem não fornecer as informações necessárias para o correto diagnóstico das necessidades nutricionais (Bernardi et al., 2015). O uso de sensores pode auxiliar a delimitar regiões (ou zonas de manejo) e, a partir desses limites, estabelecer pontos de amostragem mais direcionados. A associação dos conhecimentos pedológicos (Filippini-Alba et al., 2023) é essencial para estabelecer as zonas de manejo e direcionar a amostragem do solo.

4 ANÁLISE DE SOLO

A análise de solo para fins de recomendação de calagem e fertilizantes é um processo que utiliza métodos químicos para estimar a disponibilidade de nutrientes, simulando a capacidade de extração das plantas. É uma ferramenta valiosa para tomada de decisões sobre o manejo de nutrientes, pois com a interpretação dos resultados é possível realizar manejo químico do solo de maneira eficiente e econômica (Van Raij, 1991). Os resultados da análise determinam o estoque de nutrientes no solo e os limitantes químicos no momento anterior ao plantio, possibilitando a recomendação de correção e adubação, bem como monitorar e avaliar periodicamente o balanço dos nutrientes no solo. Além disso, o balanço de nutrientes no sistema solo-planta pode ser considerado um indicador da sustentabilidade do uso agrícola do solo.

O estabelecimento da análise de solo em uma região ou estado é precedido por pesquisa para seleção dos métodos, por meio de estudos de correlação e de calibração (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015). A avaliação da disponibilidade dos nutrientes no solo é por métodos (Primavesi et al., 2005) selecionados a partir dos estudos de correlação entre as quantidades do nutriente extraídas do solo e as quantidades do nutriente absorvidas por plantas indicadoras (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015).

5 INTERPRETAÇÃO E RECOMENDAÇÃO

Os resultados de análise de solo obtidos por métodos que se correlacionam com o crescimento da planta têm sua interpretação limitada caso não se disponham dos padrões de comparação. Dessa forma estabelece-se o procedimento de calibração, que são experimentos de campo, nos quais se avalia a produção das culturas em relação aos teores do nutriente medidos no solo (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015). A interpretação dos resultados de análise de solo tem como base os conceitos de nível de suficiência de nutrientes disponíveis, de acúmulo ou construção da fertilidade e manutenção (Olson et al., 1987; Chaganti; Culman, 2018). O nível de suficiência indica os níveis críticos (mínimos) de nutrientes individuais e indica a fase de “adubação do solo”. A partir dos níveis mais elevados há os níveis de construção (ou acúmulo) de nutrientes, e em seguida os níveis de manutenção, nos quais serão repostos às quantidades de cada nutriente removido pela cultura na colheita, ou a adubação da planta. A Tabela 2 sintetiza as faixas de interpretação dos resultados de análise de solo para fins de recomendação de calagem e fertilizantes, e foram organizadas a partir das publicações de Van Raij et al. (1996) e Alvarez Venegas et al. (1999).

Toda recomendação de calagem e adubação realizada periodicamente deve ter como base os resulta-

Tabela 2. Faixas de interpretação de resultados de análise de solo no sistema internacional de unidades.

Interpretação	pH ^c	pH [§]	M.O. [§]	P _{resina} ^c	K ^c	Ca [§]	Mg [§]	Al ^{3+§}	H+Al [§]	SB [§]	CTC [§]	V ^c	m [§]
	CaCl ₂	água	g dm ⁻³	mgdm ⁻³				mmol _c dm ⁻³				%	
Muito baixa	>6	7	7	0 - 5	0 - 0,7	<4	< 1,5	<2	< 10	< 6	< 16	0 - 25	< 15
Baixa	5,6 - 6	6,1 - 6,9	7,1 a 20	6 a 12	0,8 - 1,5	4,1 a 12	1,6 - 4,5	2,1 - 5	10,1 - 25	6,1 - 18	16,1 a 43	26 - 50	15,1 - 30
Média	5,1 - 5,5	5,1 - 6,0	20,1 a 40	13 - 30	1,6 - 3	12,1 a 24	4,6 a 9	5,1 - 10	25,1 - 50	18,1 - 36	43,1 a 86	51 - 70	30,1 - 50
Alta	4,4 - 5,0	4,5 - 5,0	40,1 a 70	31 a 60	3,1 - 6	24,1 a 40	9,1 a 15	10,1 - 20	50,1 - 90	36,1 - 60	86,1 a 150	71 - 90	50,1 - 75
Muito alta	< 4,3	< 4,5	> 70	> 60	> 6	> 40	> 15	> 20	> 90	> 60	> 150	> 90	> 75

^cVan Raij et al. (1996); [§]Alvarez Venegas et al. (1999).

dos de análises químicas realizadas previamente em amostras coletadas nos diferentes sistemas de produção. Com isso, evita-se o uso de quantidades fixas de calcário e de formulações de fertilizantes, que se utilizadas sem critérios podem levar a desbalanços. As recomendações de calagem e de adubação de pastagens podem ser encontradas em Werner et al. (1996), Cantarutti et al. (1999) e Vilela et al. (2004). Macedo (2004) analisou comparativamente essas recomendações e indicou que não havia grandes diferenças para a fase de estabelecimento, mas para a manutenção essas diferenças eram maiores. Com essas tabelas é possível recomendar a calagem e a adubação (com base na análise de solo e na exigência da forrageira) e estimar a produtividade em manejo semi-intensivo, sem, contudo, explorar todo o potencial de produção da forrageira utilizada. A adubação nitrogenada deve ser calculada em função do nível de produção desejada, ser realizada na época das águas e parcelada em no máximo 60 kg por ha por ciclo de pastejo (Costa et al., 2006; Euclides; Montagner, 2013).

Os níveis de adubação nos sistemas mais intensivos de manejo de pastagens são muito mais elevados do que os utilizados na maioria das culturas produtoras de grãos, em razão do elevado potencial de resposta das gramíneas à adubação (Primavesi et al., 2004; Martha Júnior et al., 2004). Além disso, estas recomendações de calagem e adubação para pastagens são estáticas, não contemplam os diferentes níveis tecnológicos de intensificação da produção. Em face da necessidade de reunir, organizar e disponibilizar de forma dinâmica essas informações existentes para os produtores e técnicos, a Embrapa Pecuária Sudeste criou o software Adubapasto 1.0 (Oliveira et al., 2010), gratuito e com acesso remoto pela web. Posteriormente, o software foi atualizado e atualmente está disponível para o público na versão 2.0 (Bernardi et al., 2020).

6 SENSORIAMENTO PROXIMAL E REMOTO DO SOLO

Apesar da evolução das tecnologias de AP, o diagnóstico da variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo ainda é um desafio em todo o mundo (Viscarra Rossel; Bouma, 2016). Os sensores de campo têm sido utilizados para a detecção da variabilidade e para aumentar a quantidade de dados, possibilitando a implementação da AP (Viscarra Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019). Há diferentes sensores proximais para medidas de solo, os quais atuam de forma não destrutiva e minimamente invasiva, podendo ser de eletromagnéticos, ópticos, mecânicos, acústicos e eletroquímicos (Adamchuk et al., 2004; Molin; Tavares, 2019). A maioria destes sensores for-

nece um sinal de saída, que pode ser influenciado por propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Essas 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; McBratney; Santos; Minasny, 2003; Viscarra Rossel; Bouma, 2016). Dessa forma, as 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, os levantamentos de solos têm um foco maior em modelagem quantitativa com o acompanhamento para fornecer informações que considerem a acurácia e as incertezas (McBratney; Santos; Minasny, 2003).

As técnicas de sensoriamento proximal e remoto do solo têm sido utilizadas na avaliação da variabilidade de atributos do solo pois são alternativas rápidas, geralmente de baixo custo e que permitem amostragens intensivas do solo (Demattê et al., 2015; Viscarra Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019; Filippini-Alba et al., 2023).

O conceito de sensoriamento proximal do solo refere-se ao uso de sensores compatíveis com operações em campo que atuam em contato ou próximas à superfície do solo (aproximadamente 2 m) (Viscarra Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019).

As medidas da condutividade elétrica aparente do solo (EC_a) e da resistividade elétrica (ER) combinadas com sistemas globais de navegação por satélite (*Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) e sistemas de informação geográfica (*Geographical Information Systems* – GIS) tem sido uma das técnicas mais utilizadas para caracterizar os padrões espaciais das propriedades do solo (Corwin; Lesch, 2005; Samouëlian et al., 2005; Serrano et al., 2014). A EC_a e ER apresentam correlações significativas com propriedades do solo como teores de argila, matéria orgânica, concentração de sais ou umidade (Samouëlian et al., 2005; Machado et al., 2006; Bernardi et al., 2018b, 2019b).

Existem sensores comerciais para medir a EC_a no campo com ou sem contato com o solo. Os sensores sem contato ou não invasivos são baseados no princípio de indução eletromagnética – EMI (Corwin; Lesch, 2005). Os sensores de contato introduzem uma corrente elétrica no solo através de eletrodos situados em discos que contatam com o solo e medem a resistência elétrica RE (Corwin; Lesch, 2005). Existem também equipamentos comerciais que medem a resistividade elétrica (ER) do solo (Samouëlian et al., 2005; Dabas, 2008). A EC_a (Moral et al., 2010; Bernardi et al.,

2018b) e a ER (Bernardi et al., 2019b) podem ser utilizadas para delinear zonas de manejo diferenciado.

7 MAPEAMENTO

Um mapa de solo com propriedades medidas é uma das camadas de dados mais importantes ao preparar prescrições para intervenção nos sistemas de produção utilizando as ferramentas de AP. A Figura 3 ilustra

os resultados georreferenciados da análise química de rotina de uma área de produção, considerando as faixas de interpretação (Tabela 2).

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e a estimativa das relações desses atributos no espaço e no tempo ocorre com a aplicação da geoestatística. A interpolação dos mapas pode ser realizada por diversas técnicas ou métodos, a qual permite, a partir dos pontos vetoriais com valores

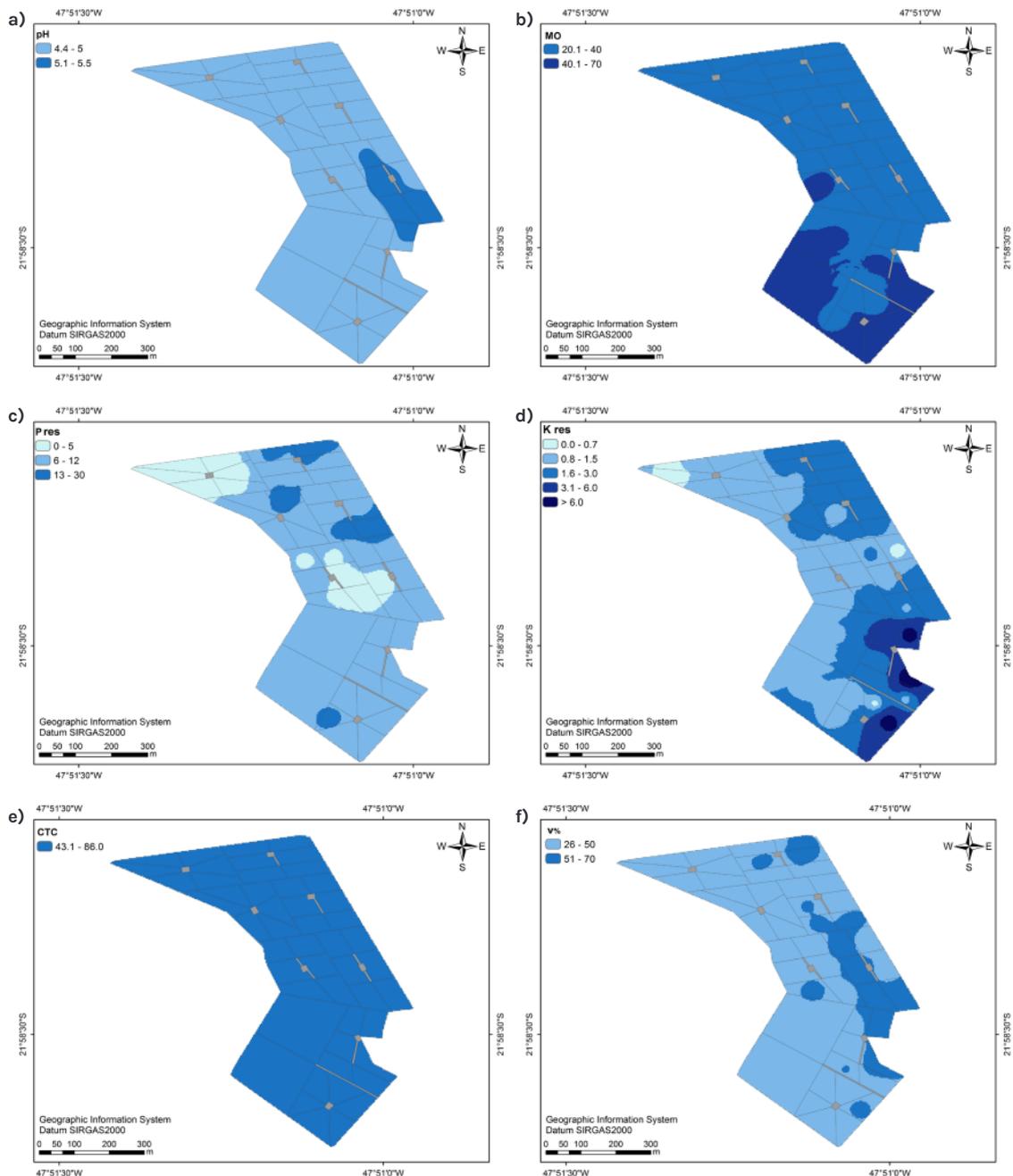


Figura 3. Resultados espacializados de análise de solo em sistema integrado e faixas de interpretação para pH (A), matéria orgânica (B), fósforo (C), potássio (D), capacidade de troca de cátions - CTC (E) e saturação por bases - V (F). Adaptado de Bernardi et al. (2017, 2019a).

conhecidos (análise do solo, por exemplo), a geração dos mapas de probabilidade destas superfícies ou uma camada *raster*, que são resultados dos valores preditos e seus erros (Grego et al., 2014; Bernardi et al., 2017).

É essencial definir um método de interpolação adequado que otimize a estimativa dos valores desconhecidos, pois existem diversos métodos de interpolação como krigagem, inverso ponderado da distância, vizinho mais próximo, triangulação com interpolação linear, médias móveis, curvatura mínima ou *spline* e polinômio local, entre outros. Enquanto a krigagem tem sido utilizada academicamente, os outros métodos de interpolação são os que mais têm sido utilizados comercialmente para gerar os mapas de prescrição de corretivos e fertilizantes. A principal diferença da krigagem dos métodos de interpolação é que estes desconsideram que as variações das distâncias influenciam no comportamento dos dados. Bernardi et al. (2017) e Santos et al. (2017) discutiram as técnicas de interpolação para geração de mapas de recomendação de calagem e adubação em pastagens.

Os algoritmos de aprendizado de máquina, ou *machine learning*, têm se mostrado técnicas eficientes no campo do mapeamento de atributos do solo e previsão de padrões (Khaledian; Miller, 2020; Nyéki et al., 2021). *Machine learning* é um processo automático de aprendizado por algoritmos eficientes para trabalhar com grandes conjuntos de dados, que pode ser utilizado em mineração de dados, reconhecimento de padrões, regressão e classificação (Khaledian; Miller, 2020; Liakos et al., 2018).

8 APLICAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM TAXA VARIÁVEL

A tecnologia de aplicação em taxa variável de insumos, ou *Variable Rate Technology* – VRT, é uma técnica para fornecer insumos de acordo com a necessidade específica de subdivisões de uma área de produção agropecuária, não considerando as características médias da área. Geralmente essa tecnologia é aplicada no manejo dos corretivos e fertilizantes, mas pode ser aplicada também para defensivos agrícolas, irrigação ou semeadura. O objetivo da VRT é otimizar o uso dos insumos (calcário e fertilizantes, por exemplo), mas garantindo o rendimento das culturas.

Com base nos resultados das amostras de solo georreferenciadas, e nas técnicas de geoprocessamento, são elaborados mapas de atributos do solo, e os mapas de prescrição de fornecimento de corretivos e fertilizantes em quantidades distintas para diferentes partes do talhão, de acordo com as necessidades específicas (Bernardi et al., 2004; Resende et al., 2014).

Mas há alguns desafios para implementar a VRF, como por exemplo a decisão se há variação de solo suficiente nas áreas para garantir o investimento na geração dos mapas e aplicação em taxa variável efetivamente. Oliveira et al. (2014) propuseram e validaram um índice de oportunidade para caracterização da variação espacial de parâmetros em diferentes etapas do processo de adoção da AP.

De acordo com Hedley (2015), os fatores que podem limitar a adoção da VRT são clima, topografia, qualidade do solo, tempo para processamento, além das interferências operacionais.

A viabilidade do uso da VRT em sistemas de produção pecuários em diferentes locais foi demonstrada por Gillingham (2001); Fu et al. (2010), Serrano et al. (2014) e Hedley (2015).

Em um sistema ILPF em São Carlos/SP, composto por pastagens de capim Piatã, em rotação com o milho e com árvores de eucalipto, foram utilizadas as ferramentas de AP para manejo da fertilidade do solo conforme descrito por Bernardi et al. (2017; 2019a). As Figuras 4 e 5 indicam, respectivamente, as recomendações para aplicação de corretivo e fertilizante em taxa variável em quatro safras consecutivas. Os resultados indicaram que foi possível reduzir em 89 e 57% as quantidades totais de calcário e supersimples. As doses de totais aplicadas em 30 ha variaram de 54,5 e 27,5 t/ha aplicadas em 2015 para 6,0 e 11,7 t/ha aplicados em 2018, respectivamente.

De acordo com Hedley (2015), serão necessárias mais pesquisas para que considerem o efeito das deposições de urina e fezes dos bovinos na aplicação de fertilizantes em taxas variáveis, pois somente mapeando a deposição variável em um piquete e o comportamento, e dinâmica de pastejo dos animais haverá o entendimento do mapa de rendimento variável de matéria seca, e, portanto, a estratégia de fertilização com N variável.

9 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO EM TAXA VARIÁVEL

Os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos devem ser considerados na análise da sustentabilidade de um sistema de produção. Fu et al. (2010) indicaram que a eficiência do uso de fertilizantes e o manejo agronômico e ambiental podem ser melhorados ajustando as entradas de fertilizantes com base na variabilidade espacial da fertilidade do solo. O retorno econômico da adubação utilizada em sistemas intensivos depende do nível de manejo da propriedade agrícola. O fornecimento de fertilizantes pode ser o principal custo de manutenção da pastagem permanente (Gillingham, 2001). Hedley (2015) indicou que

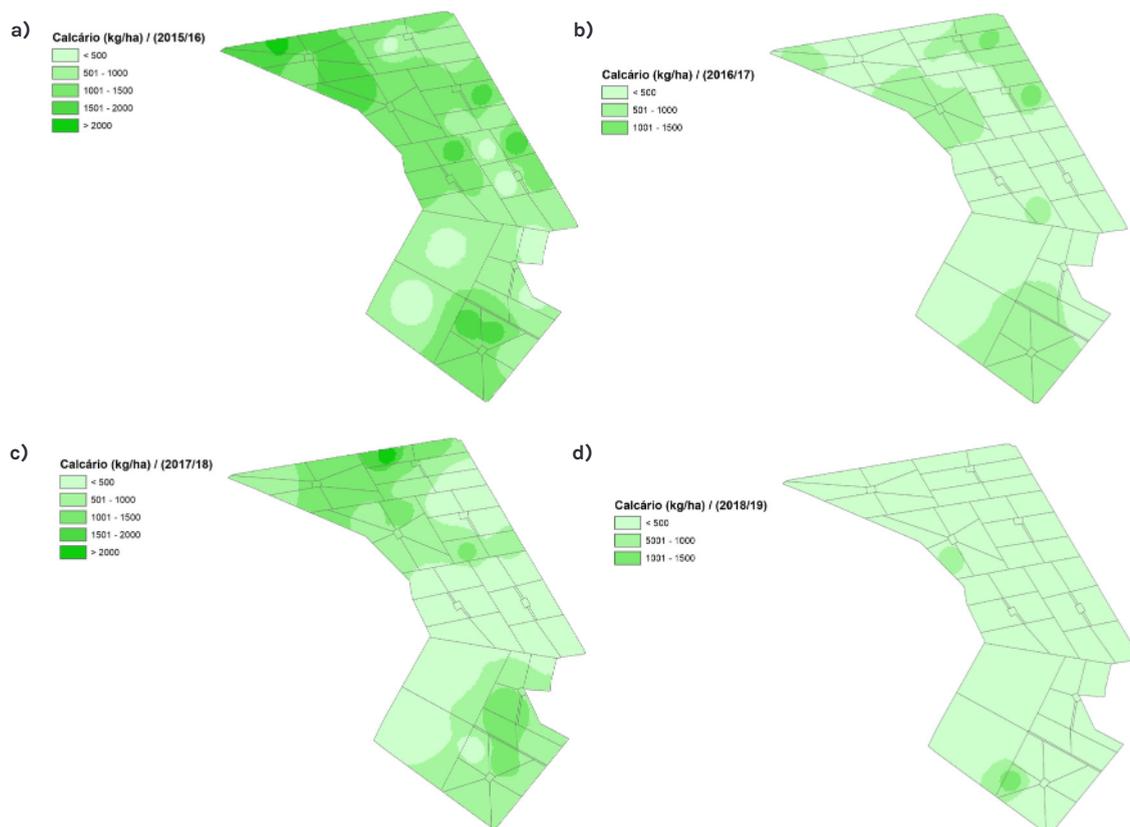


Figura 4. Mapas interpolados de aplicação de calcário em quatro safras: 2015-16 (A), 2016-7 (B), 2017-18 (C), e 2018-19 (D) em sistema integrado em São Carlos/SP. Adaptado de Bernardi et al. (2019a).

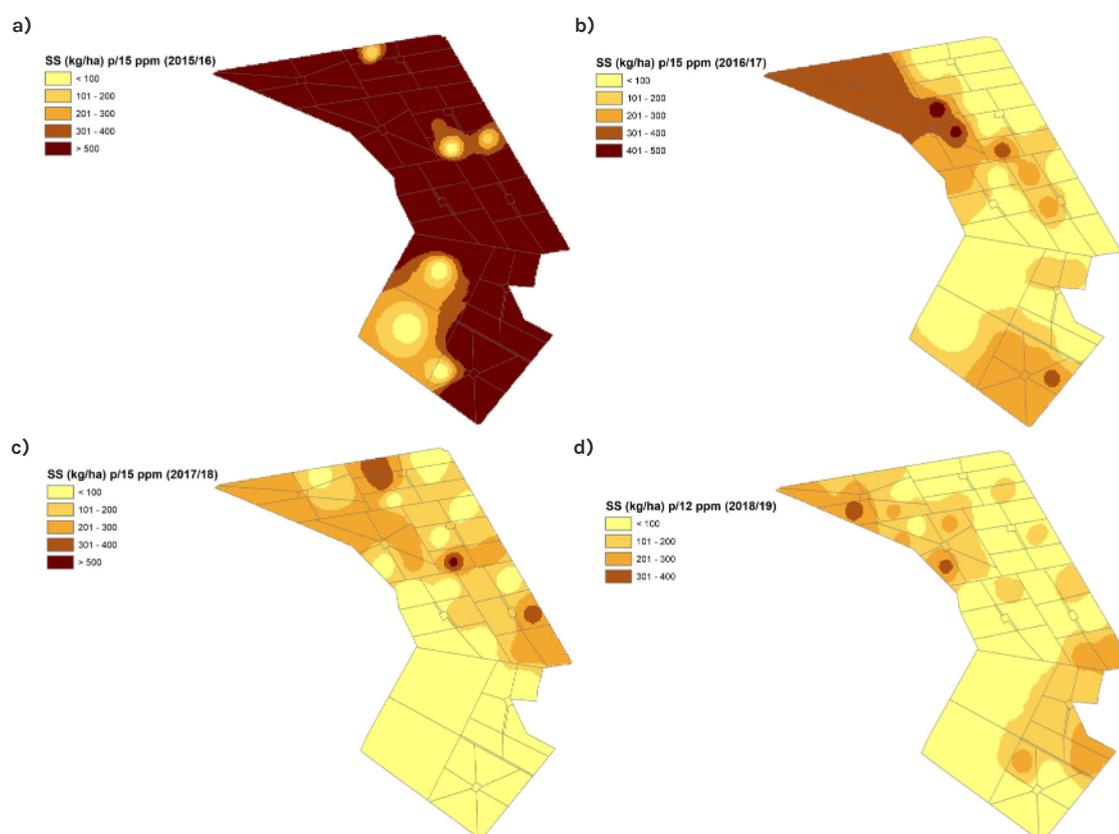


Figura 5. Mapas interpolados de aplicação de superfosfato simples em quatro safras: 2015-16 (A), 2016-7 (B), 2017-18 (C), e 2018-19 (D) em sistema integrado. Adaptado de Bernardi et al. (2019a).

o retorno financeiro (receita) dos resultados da aplicação das tecnologias da AP é positivo em relação ao investimento (custo) para adoção dessas tecnologias.

O retorno econômico da adubação utilizada em sistemas intensivos depende do nível de manejo da propriedade agrícola. Em um sistema de produção de leite, em pastagem de capim-tanzânia, Bernardi et al. (2018a) mostraram que com o uso de AP foi possível alcançar a homogeneidade dos atributos químicos do solo, e a redução do custo de produção, pela redução do uso de insumos. As quantidades totais de calcário e supersimples foram reduzidas em 95% e 96% entre o 1º e 2º ano com o uso da AP. Em 1,5 ha variaram de 42,1 e 0,5 t/ha aplicadas em 2015 para 2,2 t/ha e 24 kg aplicados no segundo ano, respectivamente (Figura 6).

Bernardi et al. (2016) estudaram a variabilidade da correção do solo e adubação com fósforo e potássio em pastagem de alfafa em um sistema de produção de leite, considerando a variabilidade espacial. Os resultados compararam a produção de matéria seca de forragem e o potencial de produção por vacas leitei-

ras em sistema de produção com pastagem de alfafa (Figura 7A e B), com a aplicação de corretivos e fertilizantes em VRT para avaliar a eficiência do sistema. Os mapas de aplicação em VRT indicaram que existem áreas em que a necessidade de calcário variava de regiões com menos de 350 kg/ha até outras com mais de 1,5 ton/ha. O fertilizante fosfatado (superfosfato simples) variava de menos de 300 kg/ha até cerca de 800 kg/ha, enquanto o potássico de menos de 100 kg/ha até mais de 500 kg/ha. Os efeitos dessas diferenças nas quantidades necessárias de fertilizantes podem ser observados no custo de produção do sistema (Figura 7G) que variou dentro da mesma área em torno de 7%. A partir das estimativas de produção foi possível calcular a receita (Figura 7H) que apresentou três classes diferentes com variação de 7,7% entre os valores extremos. O lucro (Figura 7I) é oriundo da subtração entre a receita e o custo, e apresentou variações de 9% a 27% dentro da área de produção estudada, que pode indicar o prejuízo ou o sucesso da atividade agropecuária.

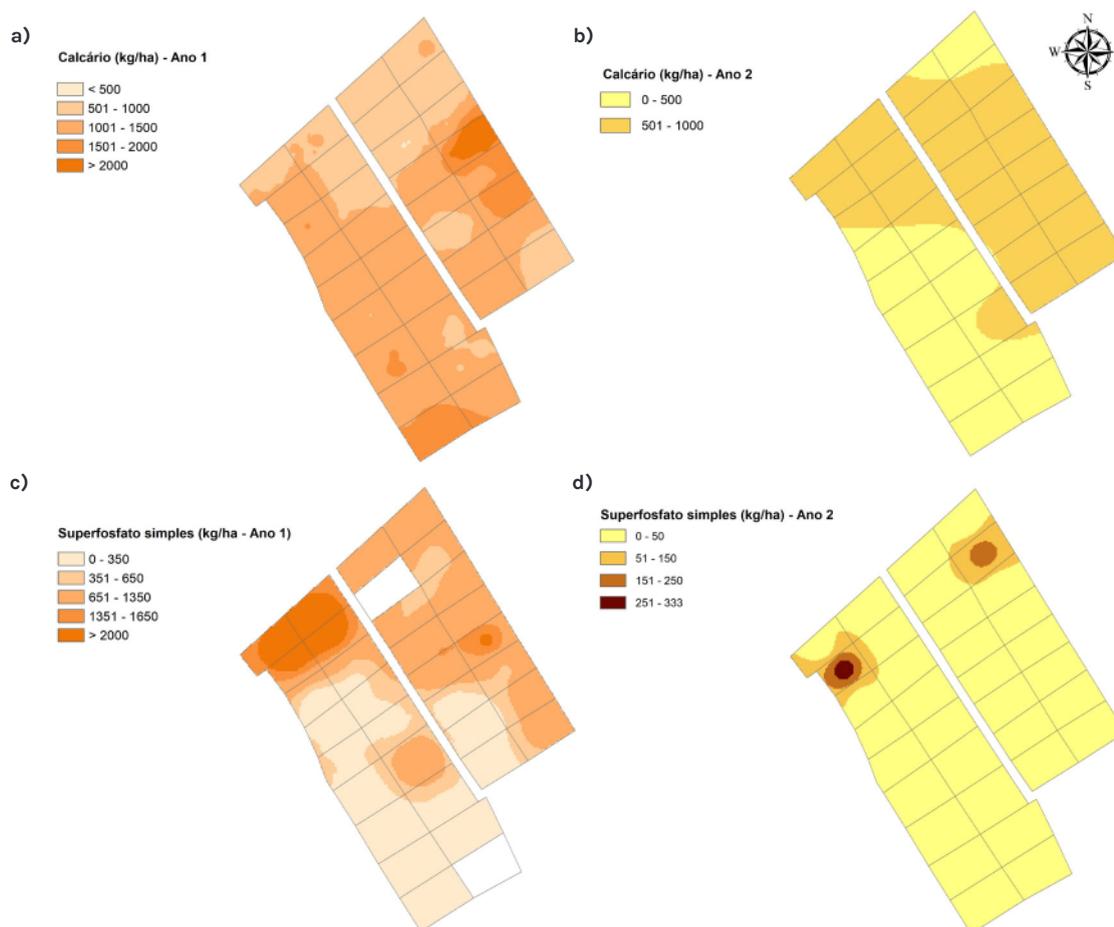


Figura 6. Mapas interpolados da aplicação de calcário (A e B) e superfosfato simples (C e D), e dos custos (E e F) em duas safras, de uma pastagem intensiva de capim-tanzânia em sistema de produção intensiva de leite. Adaptado de Bernardi et al. (2018a).

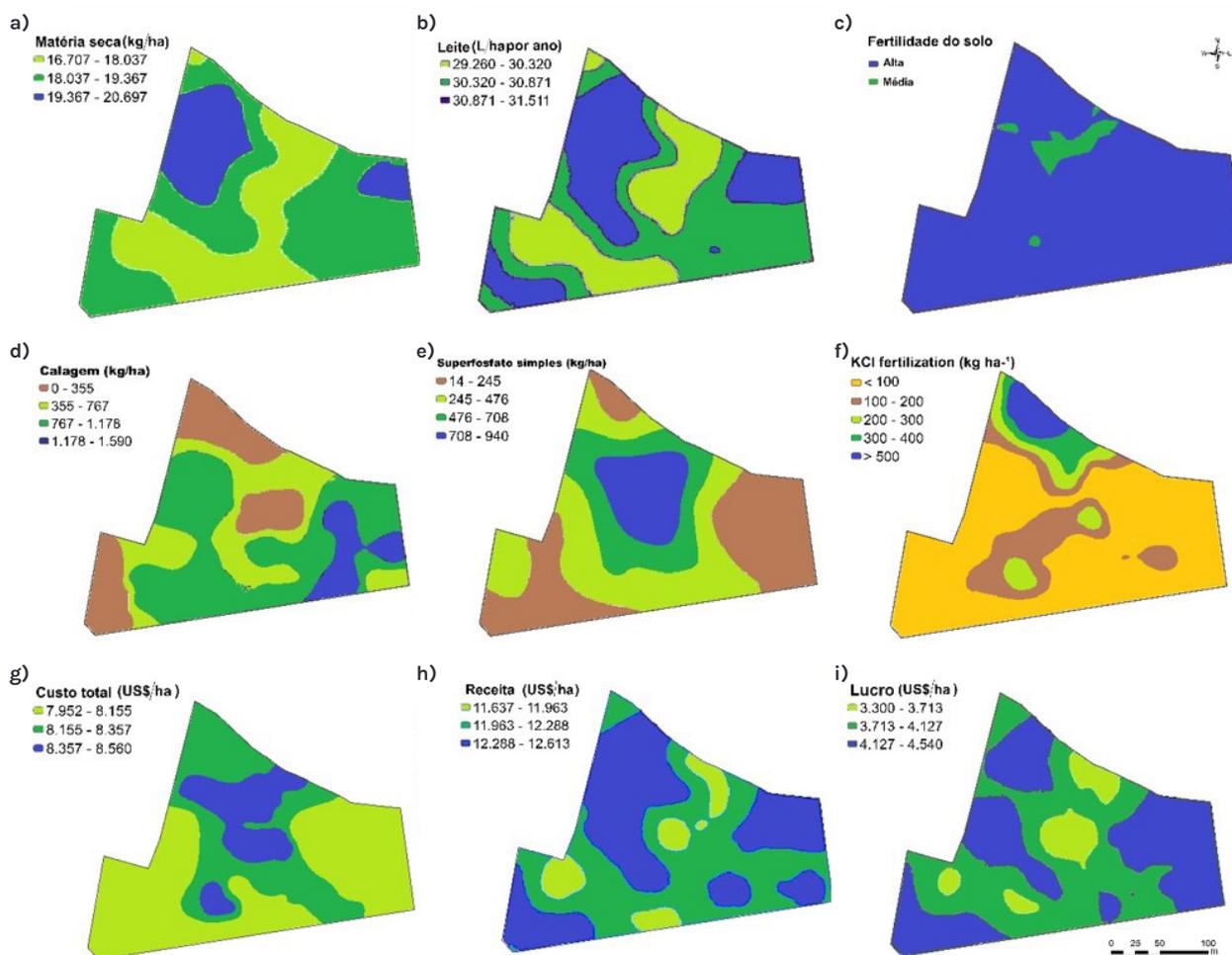


Figura 7. Mapas interpolados do custo (G), receita (H) e lucro (I) de uma pastagem de alfafa em sistema de produção intensiva de leite. Adaptado de Bernardi et al. (2016).

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados mostraram a variabilidade espacial das propriedades do solo e aplicação de calagem e fertilizantes em uma taxa variável, assim como a análise econômica de sistemas de pastagens manejadas intensivamente. A análise espacial das necessidades de calagem e adubação podem fornecer ferramentas de gestão para o manejo de pastagens. E a tecnologia da aplicação de calcário e fertilizante fosfatado à taxa variável pode ser utilizada como ferramenta de correção e adubação do solo, levando à maior homogeneidade dos atributos químicos do solo e contribuindo para melhor retorno econômico do sistema de produção.

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.
- ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (ed.). **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais: Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: UFV, 1999. p. 25-32.
- 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.; 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*, v. 32, p. 211-227, 2015.

- 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. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 590-593, 2017.
- BERNARDI, A. C. C.; BUENO, J. O. A.; LAURENTI, N.; SANTOS, K. E. L.; ALVES, T. C. Efeito da calagem e fertilizantes aplicados à taxa variável nos atributos químicos do solo e custos de produção de pastagem de capim Tanzânia manejadas intensivamente. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 4, p. 368-382, 2018a.
- BERNARDI, A. C. C.; TUPY, O.; SANTOS, K. E. L.; MAZZUCO, G. G.; BETTIOL, G. M.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Mapping of yield, economic return, soil electrical conductivity, and management zones of irrigated corn for silage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 12, p. 1289-1298, 2018b.
- BERNARDI, A. C. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, J. R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 4, p. 290-300, 2019a.
- BERNARDI, A. C. C.; PITRAT, T.; RABELLO, L. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G. G.; BETTIOL, G. M. Differences in soil electrical resistivity tomography due to soil water contents in an integrated agricultural system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. e00774, 2019b.
- BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Adubapasto 2.0. **Revista da Propriedade Industrial** (Seção VII Programa de computador), n. 2584, p. 8, 2020. Disponível em: http://revistas.inpi.gov.br/pdf/Programa_de_computador2584.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.
- 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. (eds.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 559-577.
- BERNARDI, A. C. C.; MANTOVANI, E. C. **Contribuição do Portifólio de Automação, Agricultura de Precisão e Digital ao Plano Nacional de Fertilizantes**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2021. 19 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 141).
- BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PRIMAVESI, O. Soil fertility of tropical intensively managed forage system for grazing cattle in Brazil. In: WHALEN, J. K. **Soil fertility improvement and integrated nutrient management - a global perspective**. Rijeka: Intechopen, 2012. p. 37-56.
- 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: Embrapa, 2014. p. 492-499.
- BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C.; LUCHIARI JUNIOR, A.; COSTA, C. C.; JORGE, L. A. C. **Tecnologias digitais na pecuária: aplicações, desafios e expectativas**. Análise da equipe de especialistas. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2021. p. 1-3. (Boletim CiCarne, ano 1, n. 37).
- CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 5-14, 1999.
- CANTARELLA, H.; CORREA, L. A.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. Fertilidade do solo em sistemas intensivos de manejo de pastagens. In: **SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS**, 2002, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: FEALQ, 2002. p. 99-131.
- CANTARUTTI, R. B.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, M. M.; FONSECA, D. M.; ARRUDA, M. L.; VILELA, H.; OLIVEIRA, F. T. T. Pastagens. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (eds.). **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais: Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: UFV, 1999. p. 332-341.
- CARDOSO, A. D. S.; BARBERO, R. P.; ROMANZINI, E. P.; TEOBALDO, R. W.; ONGARATTO, F.; FERNANDES, M. H. M. D. R.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Intensification: a key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in Brachiaria grasslands. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 6656, 2020.
- CHAGANTI, V. N.; CULMAN, S. W. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. **Crops & Soils**, v. 51, n. 1, p. 40-47, 2018.
- CLAY, D. E.; CARLSON, C. G. Precision soil sampling. In: CLAY, D. E.; CARLSON, C. G.; CLAY, S. A.; BYAMUKAMA, E. (eds.). **iGrow Corn: best management practices**. USA: South Dakota State University, 2016. p. 21-1-21.6. Disponível em: https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=plant_book. Acesso em: 11 jun. 2024.
- COLAÇO, A. F.; MOLIN, J. P. **Amostragem georreferenciada**. Piracicaba: ESALQ, 2014. 5 p. (Agricultura de Precisão. Boletim técnico, 02).
- CORWIN, D.; LESCH, S. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 11-43, 2005.
- COSTA, K. A. P.; OLIVEIRA, I. P.; FAQUIN, V. **Adubação nitrogenada para pastagens do gênero Brachiaria em solos do Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 60 p. (Documentos. Embrapa Arroz e Feijão, 192).
- DABAS, M. Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP®. In: CAMPANA, S.; PIRO, S. (ed.). **Seeing the unseen: geophysics and landscape archaeology**. London: Taylor & Francis, 2008. p. 105-126.

- DEMATTÊ, J. A. M.; ALVES, M. R.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T.; SOUZA, A. B.; ROMERO, D. J.; SATO, M. V. Hyperspectral remote sensing as an alternative to estimate soil attributes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, p. 223–232, 2015.
- EUCLIDES, V. P. B. VALLE, C. B.; MACEDO, M. C. M.; ALMEIDA, R. G., MONTAGNER, D. B., BARBOSA, R. A. Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, p. 151-168, 2010. Supl. especial.
- EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B. Estratégias para intensificação do sistema de produção. In: ROSA, A. N.; MARTINS, E. N.; MENEZES, G. R. O.; SILVA, L. O. C. (eds.). **Melhoramento genético aplicado em gado de corte**: Programa Genepplus-Embrapa. Brasília: Embrapa; Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2013. p. 49-60.
- FILIPPINI ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; BERNARDI, A. C. C. Pedology in Precision Agriculture from a Brazilian context. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 40, n. 3, p. e3216, 2023.
- FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management zone analyst (M.Z.A.). **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.
- FU, W.; TUNNEY, H.; ZHANG, C. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 185-193, 2010.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.
- GILLINGHAM, A. G. Precision management of fertiliser application to pasture. In: AUSTRALIAN GEOSPATIAL INFORMATION AND AGRICULTURE CONFERENCE, 1., 2001, Sydney. **Proceedings [...]**. Sydney: N.S.W. Agriculture, 2001. p. 534-541.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a 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: Embrapa, 2014. p. 74-83.
- HEDLEY, C. The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, p. 12-19, 2015.
- KHALEDIAN, Y.; MILLER, B. A. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. **Applied Mathematical Modelling**, v. 81, p. 401-418, 2020.
- LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. **Atlas Digital das Pastagens Brasileiras**, 2020. Disponível em: <http://atlasdaspastagens.ufg.br/>. Acesso em: 11 jun. 2024.
- LIAKOS, K. G.; BUSATO, P.; MOSHOU, D.; PEARSON, S.; BOCHTIS, D. Machine learning in agriculture: a review. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 1-29, 2018.
- LOPEZ, B.; HINES, P. J.; ASH, C. The unrecognized value of grass. **Science**, v. 377, p. 590-591, 2022.
- MACEDO, M. C. M. Análise comparativa de recomendações de adubação em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Piracicaba. **Anais [...]**. Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba: Fealq, 2004. p. 317-355. Fertilidade do solo para pastagens produtivas” é o tema do 21 Simpósio sobre manejo de pastagem, ocorrido em 2004.
- MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. 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.; VILELA, L.; BARIONI, L. G.; SOUSA, D. M. G. Manejo da adubação nitrogenada em pastagens. In: PEDREIRA, C. G. S.; MOURA, J. C.; FARIA, V. P. **Fertilidade do solo para pastagens produtivas**. Piracicaba: Fealq, 2004. p. 101-138.
- MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.
- MOLIN, J. P.; TAVARES, T. R. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. **Engenharia Agrícola**, v. 39, p. 126-147, 2019.
- MORAL, F.; TERRÓN, J.; MARQUES DA SILVA, J. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 335-343, 2010.
- NANNI, M. R.; POVH, F. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; OLIVEIRA, R. B. D.; CHICATI, M. L.; CEZAR, E. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, v. 68, p. 386-392, 2011.
- NYÉKI, A.; KEREPESI, C. B. D.; BENCZÚR, A.; NAGY, G. M. J. Application of spatio-temporal data in site-specific maize yield prediction with machine learning methods. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1397-1415, 2021.
- OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; SANTIAGO, R. R.; SILVA, R. F. **Software adubapasto 1.0 para recomendação de calagem e adubação para sistemas de pastejo intensivo**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2010. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 98).
- OLIVEIRA, R. P.; BRANDAO, Z. N.; BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B.; FRANCHINI, J. C.; BENITES, V. M.; SANTI, A.; GEBLER, L.; BASSOI, L. H.; ALBA, J. M. F.; SHIRATSUCHI, L. S. Sistematização do índice de oportunidade na adoção da agricultura de precisão para diferentes sistemas produtivos. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 173-179.
- OLSON, R. A.; ANDERSON, F. N.; FRANK, K. D.; GRABOUSKI, P. H.; REHM, G. W.; SHAPIRO, C. A. Soil testing interpretations: Sufficiency vs. build-up and maintenance. In: Brown, J.R. (ed.). **Soil Testing: Sampling, Correlation,**

- Calibration, and Interpretation*. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1987. p. 41-52.
- PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A. G.; FREITAS, A. R.; VIVALDI, L. J. Adubação nitrogenada em capim-coastcross: efeitos na extração de nutrientes e recuperação aparente do nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 1, p. 68-78, 2004.
- PRIMAVESI, A. C.; ANDRADE, A. G.; ALVES, B. J. R.; ROSSO, C.; BATISTA, E. M.; PRATES, H. T.; ORTIZ, F. R.; MELLO, J.; FERRAZ, M. R.; LINHARES, N. W.; MACHADO, P. L. O. A.; MOELLER, R.; ALVES, R. C. S.; SILVA, W. M. Métodos de análise de solo. In: NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 67-130.
- PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C.; CAMARGO, A. C. Conhecimento e controle, no uso de corretivos e fertilizantes, para manejo sustentável de sistemas intensivos de produção de leite de bovinos a pasto. **Revista de Agricultura**, v. 74, p. 249-266, 1999.
- 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.
- SAMOUELIAN, A., COUSIN, I., TABBAGH, A., BRUAND, A., RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, v. 83, p. 173-193, 2005.
- SANTOS, K. E. L.; BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; CRESTANA, S. 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.
- SANTOS, P. M.; EUCLIDES, V. P. B. **Demandas para pesquisa e desenvolvimento para pastagens no Brasil**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2022. (Embrapa Pecuária Sudeste, Série Documento).
- SCHELLBERG, J.; HILL, M. J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. **European Journal of Agronomy**, v. 29, p. 59-71, 2008.
- SERRANO, J.; PEÇA, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S. Avaliação de tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes: novos conceitos de gestão em pastagens permanentes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 37, p. 253-269, 2014.
- SOBRAL, L. F.; BARRETO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 15 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 206).
- VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Interpretação de resultados de análise de solo. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. p. 8-13 (IAC, Boletim Técnico, 100).
- VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres; Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.
- VILELA, L.; SOARES, W. V.; SOUSA, D. M. G. de; MACEDO, M. C. M. Calagem e adubação parapastagens. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 367-382.
- VISCARRA-ROSSEL, R. A.; BOUMA, J. Soil sensing: a new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems**, v. 148, p. 71-74, 2016.
- WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H. Recomendação de adubação e calagem para forrageiras. In: RAIJ, B. VAN; SILVA, N. M.; BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELLINAZZI, JR., R.; DECHEN, A. R.; TRANI, P. E. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. p. 263-271 (IAC, Boletim Técnico, 100).