

BALANÇO DE NUTRIENTES E MANEJO DA ADUBAÇÃO EM SOLOS DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA

Álvaro Vilela de Resende⁽¹⁾, Emerson Borghi⁽¹⁾, Miguel Marques Gontijo Neto⁽¹⁾,
Sandra Mara Vieira Fontoura⁽²⁾, Ana Luiza Dias Coelho Borin⁽³⁾, Adilson de
Oliveira Junior⁽⁴⁾, Maria da Conceição Santana Carvalho⁽⁵⁾ & Claudinei Kappes⁽⁶⁾

Introdução.....	342
Efeito residual de corretivos e fertilizantes em ambientes de produção	348
Ganhos de eficiência de aproveitamento dos nutrientes em sistemas de produção bem manejados.....	356
Identificação do <i>status</i> de fertilidade construída	359
Adubação de restituição como estratégia para uso eficiente de nutrientes e economia de fertilizantes em sistemas de produção	363
Ciclagem e créditos de nutrientes em sistemas de produção	370
Balanço de nutrientes na gestão da fertilidade e na adubação de sistema	375
Considerações finais e perspectivas	386
Agradecimentos.....	389
Referências	389

INTRODUÇÃO

Estudos da Organização das Nações Unidas (ONU) indicam que, em 2050, a população mundial atingirá 9,15 bilhões de indivíduos, persistindo maiores taxas de crescimento entre os países mais pobres e sob maior risco de insegurança alimentar, a exemplo de regiões da África Subsaariana. Também é esperado que haja aumento de renda e mudança de hábitos alimentares de grandes contingentes de pessoas em algumas regiões do planeta, de modo que o consumo *per capita* aumentará. Obviamente, os impactos dessas tendências se refletirão na demanda por alimentos. De acordo com projeções baseadas no período 2005/07 a 2050, estima-se que a taxa de crescimento no consumo mundial de produtos agrícolas será de 1,1 % ao ano, exigindo um novo patamar de produção global, que precisará ser 60 % maior, ao final desse período (Alexandratos e Bruinsma, 2012), com um incremento correspondente a 35 % até 2030 (Embrapa, 2018). Nesse

⁽¹⁾ Embrapa Milho e Sorgo. E-mails: alvaro.resende@embrapa.br; emerson.borghi@embrapa.br; miguel.gontijo@embrapa.br

⁽²⁾ Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. E-mail: sandrav@agraria.com.br

⁽³⁾ Embrapa Algodão. E-mail: ana.borin@embrapa.br

⁽⁴⁾ Embrapa Soja. E-mail: adilson.oliveira@embrapa.br

⁽⁵⁾ Embrapa Arroz e Feijão. E-mail: maria.carvalho@embrapa.br

⁽⁶⁾ Fundação Chapadão. E-mail: claudineikappes@fundacaochapadao.com.br

contexto, o Brasil se destaca num rol de poucos países detentores das principais fronteiras agrícolas, em que ainda existe disponibilidade de terra passível de incorporação à agricultura, além da possibilidade de aumento de produtividade nos espaços já desbravados.

Em levantamentos realizados nos anos 2016/2017, as áreas exploradas com produção agropecuária no Brasil somavam aproximadamente 256 milhões de hectares (ha), sendo cerca de 66 milhões de hectares ocupados com lavouras, 10 milhões de hectares com florestas plantadas e 180 milhões de hectares com pastagens. Proporcionalmente, as áreas utilizadas para o cultivo de grãos, horticultura, fruticultura e silvicultura correspondem a 9 % e as de pastagens plantadas e nativas, a 21 % do território nacional, que ainda conta com 66 % de sua extensão com cobertura vegetal nativa. Esses índices comprovam que a atividade antrópica no meio rural brasileiro é de magnitude modesta, comparativamente à de outros importantes países, que, em geral, cultivam de 20 a 30 % da superfície de seus territórios. Nos países da União Europeia, a agricultura demanda de 45 a 65 % da extensão territorial e, por consequência, são muito menores as proporções de áreas com vegetação preservada (Miranda, 2017, 2018).

Todavia, é precipitado considerar que há abundância de novas terras agricultáveis no Brasil. Atualmente, há grande ênfase na preservação dos biomas brasileiros, fundamentada sobretudo em questões ambientais, como a necessidade de conservação da biodiversidade e de uso mais sustentável dos recursos naturais. Essa linha de pensamento ganhou força, passando a fazer parte do comportamento cultural da sociedade, o que, em parte, se explica pela urbanização progressiva e pela mudança de percepções, envolvendo também a perda de vínculo dos cidadãos com o meio rural. De acordo com o censo demográfico de 2010, mais de 84 % da população brasileira está concentrada nos centros urbanos (IBGE, 2018). Concomitantemente, as pessoas têm assimilado novos conceitos de desenvolvimento, se mostrando mais exigentes quanto à qualidade dos produtos consumidos e à conformidade dos processos produtivos no campo (Lopes, 2017). Nas urbes e nos mercados no exterior, são cada vez mais acentuados os requisitos relacionados a esses aspectos, colocando o Brasil no centro das atenções.

Tudo indica que a possibilidade de expansão de fronteira agrícola, por si só, não deverá constituir uma solução nas próximas décadas, sendo essencial que se consiga efetivamente incrementar a produtividade agropecuária nas áreas já estabelecidas para tal. Saath e Fachinello (2018) analisaram os indicadores de desempenho desse segmento no Brasil em 2012, projetando-os frente às estatísticas de disponibilidade legal de terras para ampliação da

agricultura e às previsões de demanda e contribuição dos produtos agrícolas brasileiros no contexto mundial, até 2024. Nesse cenário, concluíram que as terras legalmente disponíveis como fronteira agrícola, algo em torno de 7,8 milhões de hectares, são insuficientes para que o País possa cumprir a expectativa de sua participação na condição de exportador de alimentos para o abastecimento mundial, assinalando a importância de que também se concretizem ganhos adicionais de produtividade média.

Juntos, o milho, o arroz, o trigo e a soja respondem por cerca de dois terços das calorias produzidas pela agricultura mundial e, de acordo com os dados de levantamento referente a 2008, globalmente, as produtividades médias dessas *commodities* situavam-se próximas de 5,2; 4,4; 3,1 e 2,4 t ha⁻¹, respectivamente (Ray et al., 2013). Em âmbito internacional, prevê-se que, para atender à demanda alimentar da população em 2050, minimizando a abertura de novas áreas, seria preciso dobrar as produtividades médias dos cultivos nas lavouras existentes (van Wart et al., 2013).

A agropecuária brasileira vem se adaptando a esse novo contexto e são evidentes os sinais de que será necessário aumentar substancialmente a sua eficiência. O cenário futuro exigirá intensificação sustentável da produção (Withers et al., 2018a), pela pressão convergente de múltiplos fatores sobre a atividade agrícola: 1) crescimento e urbanização populacional; 2) incremento na longevidade; 3) aumento da renda e do consumo; 4) redução da possibilidade de expansão da fronteira agrícola e valorização da terra; 5) redução da disponibilidade e aumento do custo da mão de obra rural; 6) necessidade de preservação dos recursos solo e água, e 7) adequação às políticas agrícolas e às legislações ambientais e florestais (Embrapa, 2018). Isso implica em produzir cada vez mais, sem aumento de área, e com garantias de sustentabilidade relacionadas ao uso racional dos fatores de produção, à regularidade ambiental e social, bem como a qualidade e segurança do que for oferecido ao consumidor final.

Há consenso de que aumentar a oferta global de produtos agrícolas não será tão fácil quanto foi em períodos passados da história da humanidade. Fatores limitantes concorrem para dificultar a garantia de suficiência no futuro, dentre os quais a escassez dos recursos solo e água em quantidade e qualidade, bem como a sua degradação, a tendência de diminuição das possibilidades de incrementos adicionais na produtividade das culturas e os possíveis efeitos prejudiciais decorrentes de mudanças climáticas (Alexandratos e Bruinsma, 2012; Ray et al., 2013; Saath e Fachinello, 2018).

O desafio frente a essa conjuntura é enorme e um dos pontos cruciais é que será necessária maior intensificação no uso do solo nas paisagens

agrícolas e, conseqüentemente, nos fluxos de nutrientes direcionados às culturas e às criações animais, para que sejam atingidas metas crescentes de produção. O pressuposto é que grande parte das áreas aptas, que hoje são ocupadas com monoculturas e criações extensivas no Brasil, passem a ser exploradas com sistemas integrados, mais diversificados e intensivos. Uma ação fundamental nesse processo consiste em construir e conservar a fertilidade dos solos, o que envolve práticas de controle da acidez e adubações corretivas e de manutenção, além do estabelecimento de sistemas produtivos que privilegiem a presença de matéria orgânica no solo (MOS).

Tendo em vista que a maior parte da superfície agricultável do Brasil é composta por solos tropicais oxidicos, ambientes naturalmente desprovidos de reservas abundantes de nutrientes (Resende et al., 1995; Sousa e Lobato, 2004a; Lopes e Guilherme, 2017), o seu fornecimento de forma eficiente às culturas é uma questão crítica nas tomadas de decisões de manejo. Como resultado de pesquisas iniciadas há mais de 50 anos, já estão bem estabelecidas (van Raij et al., 1996; Ribeiro et al., 1999; Sousa e Lobato, 2004a; Fontoura et al., 2015; Silva et al., 2016) e razoavelmente disseminadas as práticas envolvendo a utilização de corretivos e fertilizantes para que solos ácidos e nutricionalmente deficitários possam se tornar aptos a suportar atividades de produção agropecuária rentáveis.

Nos polos agrícolas em que a terra é cultivada de forma tecnicada, com lavouras há mais tempo, o efeito residual das adubações sucessivas promove o incremento gradual de *pools* de nutrientes que funcionam como novas reservas do sistema, de origem antrópica. Como consequência desse processo, consolida-se uma tendência de aumento de áreas cuja disponibilidade atual de nutrientes nas análises de fertilidade já se encontra acima dos níveis críticos indicados na literatura (Figura 1), caracterizando os “solos de fertilidade construída” (Resende et al., 2016a).

Todavia, mesmo nesses solos que já tiveram sua reserva potencial de nutrientes amplificada pelo efeito das adubações ao longo de anos de utilização agrícola, não é possível dispensar os procedimentos de recarga periódica via aplicações de fertilizantes. Haverá sempre necessidade de fornecimento externo de nutrientes, seja na forma de adubos minerais ou orgânicos, naturais ou sintéticos. Dada a dependência brasileira de importações de fertilizantes, que variou de 65 a 76 % do total consumido nos últimos anos (Cruz et al., 2017; ANDA, 2018) e que deverá ser ainda maior nas próximas décadas, o futuro da agropecuária nacional requererá constante busca por tecnologias e estratégias de manejo que levem à otimização do aproveitamento e à racionalização no uso desses insumos (Roy et al., 2017; Withers et al., 2018a).

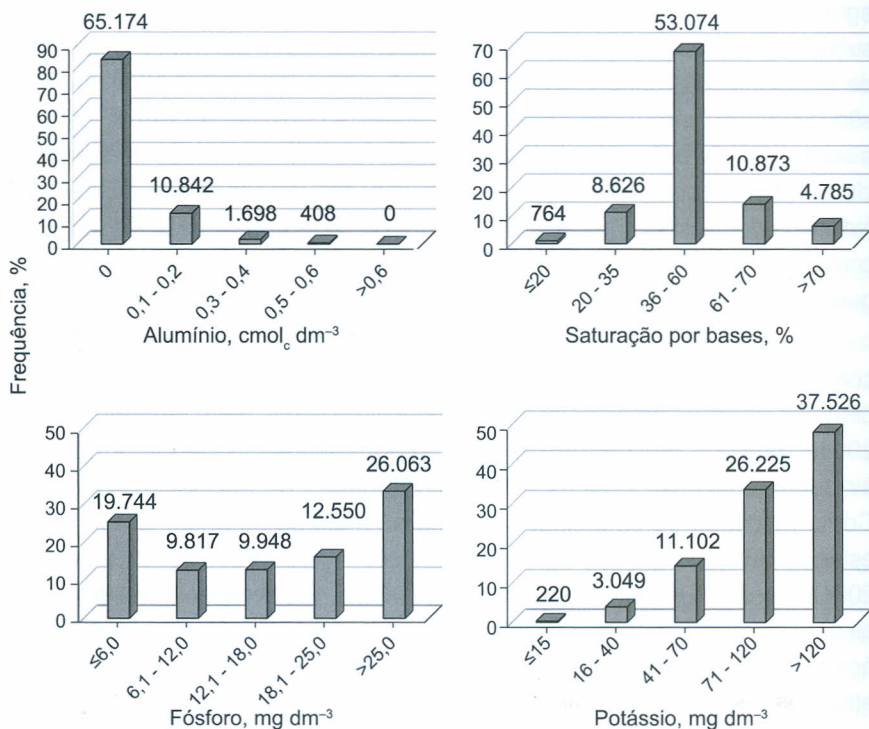


Figura 1. Distribuição de frequência de resultados de análise de atributos da fertilidade do solo em 78.122 amostras da camada de 0-20 cm de profundidade, de lavouras tecnificadas no cerrado dos estados de MG, GO, DF e BA, representando cerca de 160 mil hectares. Significativa proporção apresenta acidez sob controle, além de acúmulo de P e K, resultantes do efeito residual de corretivos e fertilizantes.

Fonte: Resende et al. (2016a).

É sabidamente comprovado que a construção química da fertilidade do solo constitui a etapa inicial e a base indispensável para que a intensificação de uso das terras seja bem-sucedida em ambientes tropicais. Mas, hoje em dia, sabe-se também que apenas o estabelecimento de condições químicas apropriadas não é garantia de produtividades elevadas, estáveis e sustentáveis (Lopes et al., 2013; De Bona et al., 2016; Tormena et al., 2017; Zancanaro et al., 2017). Nesse sentido, Kappes e Zancanaro (2014) ampliaram o conceito de fertilidade construída para o *status* conferido àqueles solos que, no início de seu cultivo, apresentavam limitações ao desenvolvimento das lavouras, mas, devidamente manejados ao longo do tempo, passaram a exibir não somente características químicas favoráveis, mas também condições

físicas e biológicas adequadas para as culturas expressarem seu potencial produtivo. É importante perceber que a manutenção de um solo equilibrado quanto aos seus atributos químicos, físicos e biológicos é pré-requisito para que haja melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e, por conseguinte, se obtenha maior eficiência no uso de fertilizantes.

Levando em conta o imprescindível papel da diversificação de plantas no condicionamento e na estabilidade de ambientes para alto rendimento, a adaptação e a viabilização prática de esquemas regionalizados de sucessão, rotação ou consórcio de culturas no espaço geográfico brasileiro deverão ser uma prioridade nos próximos anos, até mesmo visando melhorar a qualidade do sistema plantio direto (SPD), que carece de alternativas de rotação de espécies na maior parte das áreas em que é adotado. Felizmente, tem crescido o interesse inclusive em modalidades mesclando produção vegetal e animal na mesma área, a exemplo de opções de integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Para qualquer desses esquemas, é preciso desenvolver programas de adubação com recomendações de nutrição balanceada de plantas, visando atender da melhor forma possível todos os componentes de cada sistema de produção e evitar desperdícios e perdas, tendo como objetivo final a máxima conversão dos fertilizantes aplicados em produtos vegetais e/ou animais de interesse.

Nos dias atuais, as expectativas de benefícios quanto à adoção do SPD e à aplicação do manejo integrado da fertilidade do solo vão além dos aspectos de eficiência agrônômica e econômica na propriedade rural, visto que ambas as iniciativas fazem parte também dos compromissos nacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura, como mecanismos para mitigar mudanças climáticas globais (Brasil, 2012), assumindo assim um viés de relevância ambiental, estratégico para o País.

Os solos de fertilidade construída representam uma realidade emergente na agricultura brasileira e sua exploração, atrelada à intensificação e à diversificação dos cultivos, implica em mudanças conceituais e operacionais, envolvendo processos mais dinâmicos e complexos de transferência de nutrientes. Há ainda lacunas de entendimento sobre o seu funcionamento e um campo aberto para o avanço científico e tecnológico, com desafios e oportunidades rumo a formas de gerenciamento inteligente e mais eficiente dos ambientes de produção. No presente capítulo, busca-se consolidar conceitos, atualizar critérios e apresentar condicionantes do manejo da fertilidade nesses ambientes, enfatizando o balanço de nutrientes e a adubação de restituição como abordagens para ganhos de eficiência técnica, econômica e ambiental no uso de fertilizantes em diferentes sistemas produtivos.

EFEITO RESIDUAL DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Historicamente, a produtividade da agricultura brasileira tem mantido estreita e direta relação com a utilização de adubos. Ao longo das últimas cinco décadas, a produção das principais culturas vem aumentando, em paralelo com o crescimento no consumo de fertilizantes. Entre 2000 e 2015, o uso de fertilizantes cresceu 87 %, convergindo no significativo aumento de 150 % na produção de grãos, no mesmo período (Embrapa, 2018). Ao constituir um dos fatores que promovem incremento na produção por área, a adubação tem contribuído para reduzir a pressão de abertura de novas terras para uso agrícola no País (Lopes e Guilherme, 2007). Portanto, como a área cultivada não tem crescido na mesma proporção do uso de fertilizantes (Withers et al., 2018a) e sabendo que as culturas não aproveitam integralmente o que é aplicado na adubação a cada estação de cultivo (Syers et al., 2008; Ceretta, 2009), é de se esperar que haja enriquecimento gradual da fertilidade dos solos a partir do momento em que se empregam processos produtivos mais tecnificados (Figura 1).

A consolidação do uso de sistemas conservacionistas de manejo, como o SPD, é outro fator que tem favorecido a melhoria da fertilidade dos solos, a começar pela prevenção de perdas por processos erosivos. O menor revolvimento também resulta em diminuição do contato entre os íons nutrientes e as partículas de solo, amenizando as reações de adsorção de fosfato, por exemplo. Mas talvez o principal benefício esteja na conservação da matéria orgânica. Esta serve de substrato para microrganismos e contribui como fonte na nutrição das culturas, além de seus constituintes terem papel na redução da intensidade de fenômenos de indisponibilização e de perdas de determinados nutrientes (Guppy et al., 2005; Lopes et al., 2004; Anghinoni, 2007, 2009; Canellas et al., 2008; Zhu et al., 2018).

A ocorrência de efeito residual devido ao uso de corretivos e fertilizantes no Brasil é reportada em experimentos envolvendo calagem (Pandolfo e Tedesco, 1996; Miranda et al., 2005; Caires et al., 2011; Prochnow, 2014), gessagem (van Raij, 1988; Sousa et al., 2005; Caires et al., 2011; Pauletti et al., 2014) e adubações com P (Sousa e Lobato, 2004b; Resende et al., 2006; Gatiboni et al., 2007; Fontoura et al., 2010; Nunes et al., 2011; Sousa et al., 2016), K (Ritchey et al., 1987; Borkert et al., 2005; Werle et al., 2008; Kaminski et al., 2010; Rosolem et al., 2012), enxofre S (Rein e Sousa, 2004; Sousa et al., 2005; Caires et al., 2011; Pauletti et al., 2014) e micronutrientes

(Galvão, 2004; Abreu et al., 2007, Moraes et al., 2016a). Assim, a adição de insumos para o condicionamento da fertilidade eleva a disponibilidade de nutrientes no solo, em maior ou menor grau, podendo criar estoques suficientes para cobrir a demanda de cultivos subsequentes, dependendo do nutriente e das características do solo, dentre outros fatores.

O efeito residual normalmente já se expressa a partir das primeiras aplicações de nutrientes em solos nunca cultivados e tende a se tornar mais evidente à medida que essas práticas são repetidas numa mesma área. Em sistemas de produção com maior investimento tecnológico e uso mais intensivo de adubos e corretivos, geralmente verifica-se que nutrientes, como P, Ca, Mg e Zn, apresentam tempo de residência mais prolongado e tendem a se acumular no sistema, com nítido reflexo em elevação dos teores disponíveis na análise de solo. Comportamento intermediário se percebe no caso do K, S e cobre (Cu), cuja disponibilidade pode oscilar de forma um pouco mais abrupta, a depender do balanço entre as quantidades fornecidas e a demanda pelas culturas. Já para nitrogênio (N) e boro (B), sabe-se que a permanência em condições de aproveitamento pelas plantas tende a ser transiente, caracterizando baixo efeito residual, mesmo com adubações frequentes e doses relativamente elevadas (Resende et al., 2016a).

O nitrogênio geralmente não permanece disponível por prazo longo após o seu fornecimento na forma de fertilizante mineral, por se tratar de um elemento muito propenso a transformações e perdas, principalmente por lixiviação e volatilização (Cantarella, 2007). Entretanto, os níveis e a dinâmica da MOS, assim como a quantidade e a relação C/N dos restos culturais, são fortes condicionantes da disponibilidade de N e sua contribuição para o balanço desse nutriente nos sistemas de produção não pode ser ignorada. No caso do B, a retenção na camada arável é relativamente fraca, sendo removido por lixiviação (Rosolem e Bíscharo, 2007). Além disso, a análise de solo por extração com água quente, método largamente utilizado em laboratórios brasileiros, apresenta limitações (Abreu et al., 2007) e nem sempre expressa a real disponibilidade desse micronutriente às plantas.

Talvez o P seja o nutriente mais emblemático relacionado ao enriquecimento cumulativo do solo pela aplicação de fertilizantes. Apesar da marcada capacidade de adsorção de fosfatos nos solos tropicais, bem como a prevalência de reações de conversão de formas lábeis em outras de menor labilidade, concorrendo como um dreno das frações mais disponíveis às plantas (Novais et al., 2007; Roy et al., 2017), os teores de P extraído nas análises de fertilidade tendem a aumentar com o tempo de cultivo e adubações periódicas (Sousa e Lobato, 2004a; Fontoura et al., 2010; Roy et al., 2017).

Tudo indica que, atualmente, se vivencia no Brasil uma substancial mudança na condição de suprimento de P nos solos agrícolas, processo pelo qual já passaram outros países de agricultura desenvolvida. Em várias partes da Europa e da América do Norte, e de países como China e Índia, a acumulação residual do nutriente oriundo de fertilizantes e esterco fez com que os teores disponíveis nos solos extrapolassem os níveis críticos, acima dos quais são reduzidas as chances de resposta das culturas a novas adubações. De modo muito mais proeminente que no Brasil, há zonas agrícolas em diversos países que apresentam solos com grandes reservas de P derivadas de adubações realizadas no passado (Syers et al., 2008; Sattari et al., 2012), constituindo o chamado “legado de fósforo” (*phosphorus legacy*, em inglês). A condição de alta saturação dos solos com P traz importantes implicações para o manejo agrônômico sustentável, no qual são enfatizadas medidas para alcançar maior eficiência técnica e economia no uso de fertilizantes derivados de fontes não renováveis, além de mitigar riscos ambientais relativos ao carreamento de fosfatos, que provoca eutrofização de mananciais de água (Syers et al., 2008; Bouwman et al., 2017; Zhu et al., 2018).

Estima-se que os solos brasileiros já tenham recebido 45,7 Tg de P via fertilizantes minerais desde que começaram a ser fertilizados, por volta de 1960, correspondendo a um montante acumulado, como P residual, da ordem de 22,8 Tg, estoque que potencialmente pode funcionar como uma fonte secundária do nutriente nos sistemas de produção (Withers et al., 2018a). Esse legado representa uma verdadeira “poupança” do nutriente nas áreas de cultivo, englobando compostos fosfatados de maior ou menor labilidade, com graus variados de fitodisponibilidade, bem como de reversibilidade das formas menos disponíveis (Syers et al., 2008; Rodrigues et al., 2016). No entanto, Roy et al. (2017) ponderaram que, mesmo após décadas de adubação com quantidades de P que excedem as exportações nas colheitas, solos tropicais muito intemperizados, como os do Cerrado brasileiro, ainda podem apresentar elevada capacidade de adsorção de fosfato, razão pela qual demandariam muitos anos de adubação excedente para atingir equilíbrio sem prejuízo da produtividade.

A tentativa de dimensionamento da proporção do P residual aproveitável pelas plantas em curto, médio e longo prazo envolve estimativas complexas, que são influenciadas por um grande número de variáveis relacionadas a tipo de solo, histórico de adubação, atividade microbológica e características das espécies vegetais, além de questões metodológicas. Esses complicadores explicam, em parte, a dificuldade de se encontrarem resultados convergentes entre os trabalhos de pesquisa nessa linha. Quantificar os diferentes *pools* de P orgânico e inorgânico, assim como avaliar sua dinâmica sob o efeito de

sistemas de cultivo, formas de adubação e outras práticas culturais, demanda tempo e procedimentos laboriosos, com custo elevado. Por tudo isso, ainda não se dispõe de um protocolo eficaz para aplicação em rotina, que possa subsidiar a decisão de manejo nas fazendas. Como se perceberá adiante nesse capítulo, a análise de solo tradicional ainda é a melhor ferramenta de monitoramento do efeito residual das adubações e do poder tampão do solo, permitindo aferir e, se necessário, reorientar o gerenciamento da fertilidade em sistemas de produção.

Cabe aqui assinalar o caso do P, nutriente para o qual a ciência vem apresentando avanços substanciais no entendimento da dinâmica desde curto até longo prazo no solo, com mudanças conceituais importantes. Syers et al. (2008) detalharam um modelo conceitual acerca do destino, da dinâmica e da disponibilidade do P inorgânico aplicado via fertilizantes (Figura 2), no qual salientaram a considerável reversibilidade dos processos de conversão do P solúvel, liberado pela dissolução dos fertilizantes, para formas de diferentes graus de labilidade. Esse novo modelo mostra-se coerente com a mudança nos padrões de resposta à adubação fosfatada observada em solos que vêm sendo fertilizados há vários anos, cujos compartimentos de disponibilidade mais imediata seriam reabastecidos, sucessivamente, pela efetiva liberação do nutriente de compartimentos mais recalcitrantes, garantindo o suprimento às culturas sem a necessidade de doses elevadas nas adubações de manutenção.

Essa funcionalidade foi comprovada por Gatiboni et al. (2007), a partir de um estudo sobre a biodisponibilidade de formas de P em amostras de solo sob SPD que havia recebido diferentes níveis de adubação fosfatada durante seis anos. Os autores constataram que, em longo prazo, todas as formas de P do solo participam no provimento de P às plantas, sendo que, em solos com acúmulo do nutriente pela adubação, tanto formas inorgânicas quanto orgânicas são fontes efetivas no tamponamento do sistema. Informações dessa natureza robustecem a perspectiva de que, em sistemas consolidados com certa “saturação de P” (solos de fertilidade construída), bastaria a reposição do que for removido nas colheitas para manter um equilíbrio dinâmico entre adsorção/precipitação e reconversão do nutriente a formas disponíveis, atendendo satisfatoriamente às exigências das culturas por ciclos sucessivos.

Essa lógica contrasta com o senso tradicional, que, a rigor, enfatiza a ocorrência de uma indisponibilização permanente da maior parte do P adicionado ao solo nas adubações, no fenômeno genericamente referido como “fixação de P”. De modo menos acentuado do que o observado nos solos de clima temperado, muitas áreas de cultivo no Brasil já apresentam indícios

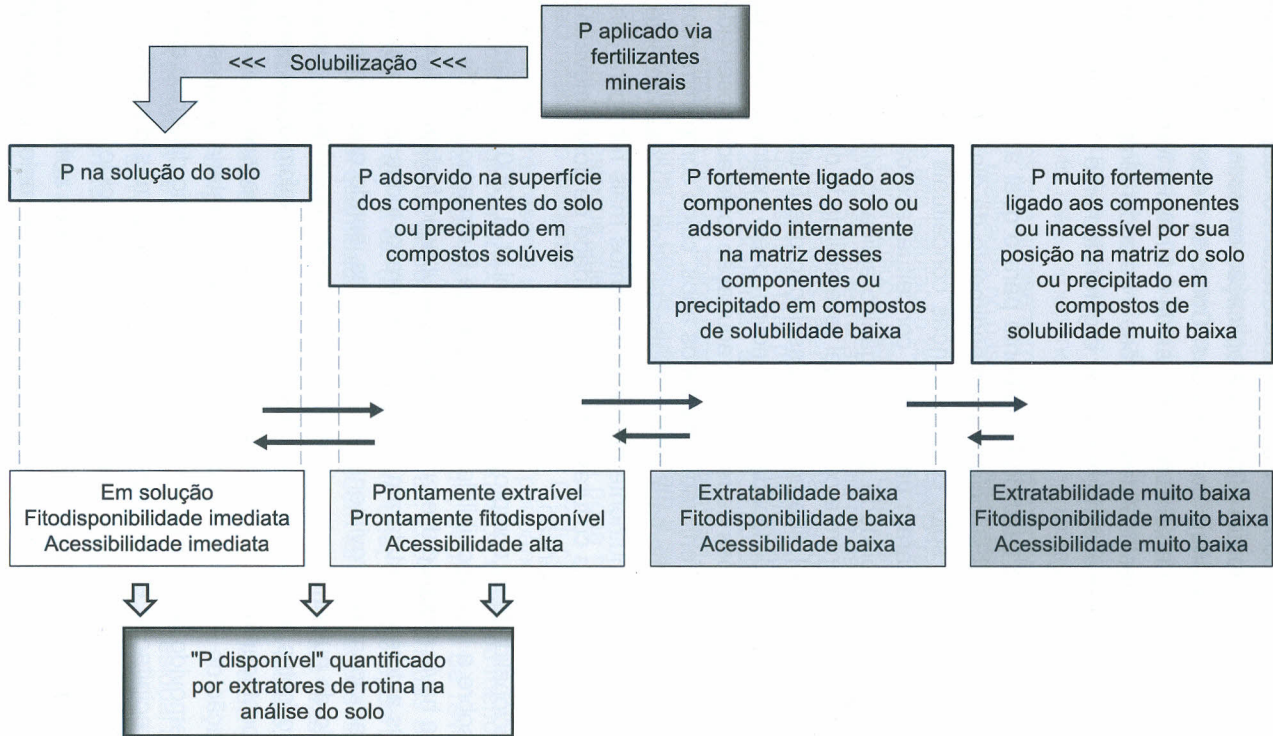


Figura 2. Diagrama conceitual dos compartimentos, dinâmica e fitodisponibilidade do P inorgânico no solo a partir da solubilização de fertilizantes minerais, destacando a efetiva reversibilidade dos processos de transferência do nutriente entre os três primeiros compartimentos.

Fonte: adaptada de Syers et al. (2008).

de que o modelo de Syers et al. (2008) explicaria o comportamento do P e a resposta das culturas à adubação nos solos de fertilidade construída em SPD (Figura 2). Pode-se considerar que tais mudanças de conceito representam uma quebra de paradigma, com impacto no manejo da adubação fosfatada. Isso porque ainda persiste e é disseminada no Brasil uma visão tradicional e hermética a respeito do destino do P aplicado ao solo e sobre a eficiência das adubações com o nutriente.

Resultados de pesquisas publicados nas duas últimas décadas (Anghinoni, 2007; Sousa et al., 2016) são inequívocos em revelar que não é totalmente verdadeira a afirmação de que o P inorgânico solúvel liberado dos fertilizantes interage com os componentes do solo, passando a integrar diferentes compostos e expressar irreversível redução de solubilidade/disponibilidade com o tempo decorrido da adubação. As consequências desse novo entendimento (Figura 2) parecem ainda não ter sido devidamente difundidas no meio acadêmico-científico brasileiro, na indústria de fertilizantes, bem como na forma de reorientação de critérios aos produtores e técnicos, que, em geral, têm aplicado o mesmo protocolo de adubação, com doses mais ou menos fixas, independentemente das características do solo (Roy et al., 2016, 2017) e de outros fatores que levam à menor resposta à adubação fosfatada em lavouras com mais tempo de cultivo.

Ainda persistem incertezas sobre a magnitude e a duração futura da capacidade de o P residual atuar como tampão da disponibilidade de P em atendimento à demanda das culturas nos solos brasileiros (Withers et al., 2018a). Não obstante, são frequentes situações em que a resposta à adubação fosfatada é baixa ou mesmo ausente em solos de fertilidade construída, conforme constatado em trabalhos conduzidos em diferentes regiões (Sá, 2004; Pauletti, 2006; Resende et al., 2006; Anghinoni, 2007, 2009; Fontoura et al., 2010; Lacerda et al., 2015), em que reduzidas doses de fertilizantes são suficientes para a obtenção de produtividades satisfatórias. Nessas circunstâncias, o manejo mais racional seria adotar a adubação fosfatada de restituição, apenas repondo as quantidades de P exportadas no decorrer do tempo, no intuito de conciliar economia de fertilizante e manutenção das reservas do solo, sem prejuízo da produtividade das culturas, além de minimizar os riscos ambientais já mencionados.

De maneira análoga ao P, a condição de fertilidade construída inibe as respostas à aplicação de outros macro e micronutrientes que apresentam efeito residual expressivo. O K tem sua dinâmica sensivelmente afetada pelas características ligadas ao tamponamento do solo, que, nesse caso, são bem refletidas pela capacidade de troca de cátions (CTC). Há importantes

diferenças regionais entre os solos, que influenciam na avaliação da fertilidade, nas respostas à adubação e na capacidade de armazenamento de K residual entre as diversas zonas agrícolas brasileiras. Os solos da região Sul geralmente apresentam maior reserva natural de K, derivada de materiais de origem mais ricos, enquanto no Cerrado a disponibilidade original é menor e diminui no gradiente de solos com textura argilosa a arenosa. Nessa sequência, tem-se um decréscimo na CTC, aumentando a predisposição a perdas por lixiviação e, conseqüentemente, dificultando a manutenção de níveis elevados de disponibilidade do nutriente. De modo bem mais acentuado do que acontece com o P, a absorção de K pelas plantas pode, no decorrer de alguns ciclos de cultivo, provocar alterações significativas nas reservas do solo, especialmente ao considerar que as culturas agrícolas extraem do solo quantidades muito maiores de K em relação ao P.

A lixiviação de K ocorre em solos brasileiros com diferentes texturas e tanto os teores trocáveis quanto os não trocáveis podem ser alterados em função de perdas ou absorção pelas culturas (Werle et al., 2008; Kaminski et al., 2010; Rosolem et al., 2012). A CTC é o principal fator que controla o potencial de reserva ou de lixiviação. Independentemente da textura, a remoção do K para fora da zona de atuação radicular é mais intensa em regiões que apresentam alto índice pluviométrico. Isso ajuda a explicar por que solos de textura argilosa em diferentes locais do Cerrado apresentam níveis muito distintos de acumulação de K disponível, resultantes de sistemas de culturas e adubação semelhantes. É o caso, por exemplo, quando se comparam resultados de análises de solos argilosos de determinadas áreas de produção de grãos de Goiás e do norte do Mato Grosso (região mais chuvosa), em que as primeiras parecem acumular mais K residual, pois apresentam teores duas a três vezes mais altos de K disponível. Esse contraste indica clara necessidade de estratégias diferenciadas de manejo da adubação potássica, ajustadas de acordo com as especificidades locais.

Na dinâmica dos diversos nutrientes, mecanismos distintos dão origem a compartimentos de reserva e seu efeito tamponante sobre a disponibilidade no solo. Mas, em geral, o sistema coloidal do solo é que governa a capacidade de estocagem e o potencial de suprimento à medida que as plantas promovem a absorção necessária ao seu desenvolvimento. Desse modo, ao disporem de maior quantidade de colóides, os solos argilosos e ricos em matéria orgânica formam um sistema mais tamponado (Figura 3), no qual, em princípio, o *status* de fertilidade construída adquire caráter mais estável, conferindo flexibilidade e segurança para ajustes no dimensionamento das adubações visando equilibrar o balanço de entradas e saídas de nutrientes.

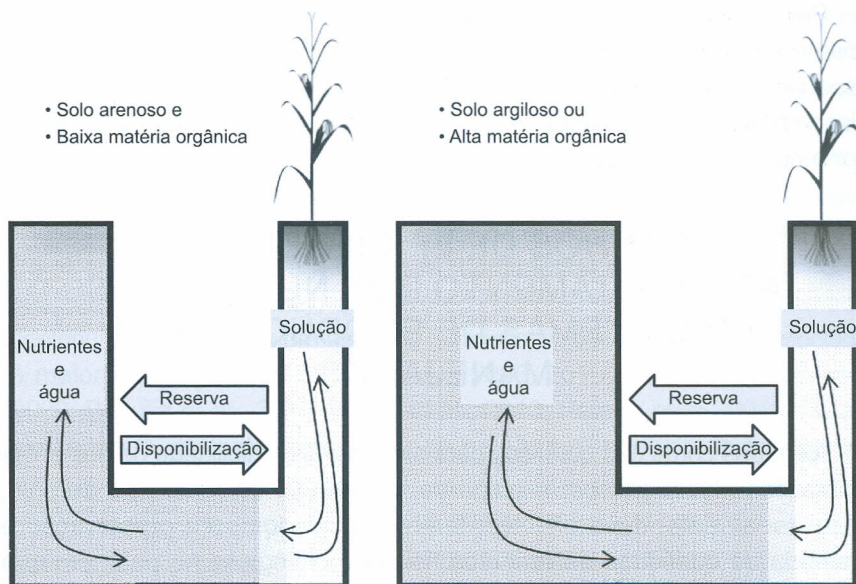


Figura 3. Diagrama ilustrativo de diferentes condições de tamponamento, implicando em capacidades distintas de o solo reservar nutrientes e água, e manter o sistema abastecido por mais tempo à medida que ocorre a absorção radicular. O manejo para incremento do conteúdo de MOS é única forma de aumentar o poder tampão de solos arenosos.

Fonte: elaborada por Álvaro Resende.

A intensidade com que ocorre o aumento das reservas de nutrientes ou a elevação da saturação por bases (V %), assim como a duração de seu efeito sobre o desempenho das culturas, estão intimamente associadas ao grau de tamponamento do solo e seus condicionantes. Comparativamente a um sistema baseado em solo arenoso, menos tamponado, um ambiente de solo argiloso demanda que maiores quantidades de adubos e corretivos sejam aplicadas para que haja incremento nos respectivos atributos de interesse aos níveis necessários para o bom desenvolvimento dos cultivos. Porém, uma vez abastecido, este mesmo solo argiloso é capaz de suprir as exigências das plantas durante mais tempo, proporcionalmente ao tamanho dos estoques criados. Independente da textura, o poder tampão do solo é modulado também pela influência de seus constituintes orgânicos, sendo diretamente proporcional ao conteúdo de matéria orgânica (Silva et al., 1994; Sá et al., 2010; Canellas et al., 2008), cujo efeito é ainda mais notório no caso dos ambientes muito intemperizados das zonas tropicais, em que as argilas são de baixa atividade.

Pelo exposto, conclui-se que a condição de fertilidade construída não é uniforme entre ambientes e nem estática. Na realidade, além da variação espacial, caracteriza-se pela oscilação temporal dos níveis de acidez e de disponibilidade de nutrientes, e, por isso, não dispensa a aferição periódica por meio de análises de solo.

GANHOS DE EFICIÊNCIA DE APROVEITAMENTO DOS NUTRIENTES EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO BEM MANEJADOS

Além das correções químicas para alcançar disponibilidade de nutrientes acima dos níveis críticos, a etapa de construção da fertilidade do solo, necessariamente, deve envolver também cuidados para preservação e melhoria da qualidade de atributos físicos e biológicos no perfil em que ocorrem as interações solo-planta. Ganha importância a visão do correto manejo do sistema como um todo, integrando, conforme a necessidade, o plantio direto, a diversificação de culturas, o uso de plantas de cobertura e a adubação verde. Em conjunto, essas práticas promovem a conservação do solo e da palhada; melhores condições de nutrição das culturas, inclusive pela fixação biológica de N (FBN) e pela ciclagem de nutrientes; a manutenção da qualidade física; o equilíbrio microbiano, e a retenção de água no sistema.

Apesar da dificuldade de se incrementarem os teores de MOS, mormente nas regiões tropicais (Sá et al., 2015; Crusciol et al., 2015; Corbeels et al., 2016), a possibilidade de qualquer acréscimo ou pelo menos a manutenção dos teores originais de matéria orgânica nos solos manejados em SPD representa substancial ampliação da sua capacidade de reserva e suprimento de nutrientes e água, comparativamente ao cultivo contínuo sob preparo convencional com aração e gradagem. Há variação no potencial de acúmulo de carbono (C) no solo sob lavouras, devido a combinações de culturas e ao tipo de clima. Em áreas sob SPD, o acúmulo médio de C até a profundidade de 20 cm é da ordem de 350 e 480 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, para condições tropicais e subtropicais no território brasileiro (Bayer et al., 2006). Esses dados refletem as diferenças e os desafios impostos ao manejo para preservação da MOS conforme a agricultura avança para regiões de menor latitude.

Os efeitos benéficos da MOS decorrem da sua contribuição proporcionalmente mais elevada para a capacidade de troca de cátions

(CTC) e para a retenção de água nos solos tropicais, principalmente nos arenosos (Silva et al., 1994; Ucker et al., 2016), além do papel positivo dos constituintes orgânicos na qualidade estrutural do solo, a qual afeta a capacidade de as plantas crescerem raízes e absorverem nutrientes no perfil (Syers et al. 2008). Como resultado, solos com maior conteúdo de carbono orgânico estão vinculados a níveis mais elevados de fertilidade, de biomassa microbiana e de produtividade de grãos (Sá et al., 2009; Lopes et al., 2013; Sá et al., 2015). Embora a premissa fundamental seja a adoção do SPD, qualquer prática de manejo que favoreça o incremento de carbono no perfil contribui para melhorias em atributos químicos, físicos e biológicos associadas à maior presença de MOS (Sá et al., 2008, 2010; Vezzani e Mielniczuk, 2009; Babujia et al., 2010; Lopes et al., 2013; Pereira et al., 2016), a qual acaba tendo, portanto, forte influência na eficiência de uso de fertilizantes.

Grande parte da expansão recente da atividade agrícola no Brasil vem ocorrendo pela incorporação de áreas de solos arenosos em diversas regiões. Esses solos, sendo ambientes menos tamponados, representam maior risco à estabilidade de produção. Nesse caso, a MOS assume uma função primordial para a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental da exploração agrícola. No tocante à construção da fertilidade, um dedicado manejo visando incrementos na matéria orgânica é a única forma de intervenção capaz de promover simultaneamente a qualidade química, física e biológica, com agregação de algum tamponamento adicional para a conservação de nutrientes nesses solos (Ucker et al., 2016), visto que a sua granulometria grosseira não se modifica e a participação dos coloides minerais como agentes tamponantes pode ser irrisória para estocar e manter adequado fluxo de nutrientes às culturas (Figura 3).

A bioporosidade criada pela atividade radicular e mesofauna do solo, e a possibilidade das raízes de algumas plantas penetrarem em camadas mais compactadas estão entre os fatores que têm motivado a preconização de sistemas de produção, como a rotação e o consórcio de culturas em SPD (Andrade et al., 2010). No que diz respeito à intensificação ecológica, já é perceptível que não basta uma alternância de duas culturas no tempo (ex.: soja-trigo, soja-milho) para o produtor se manter competitivo. É preciso mais, tirando o máximo proveito das alternativas possíveis de acordo com a oferta ambiental e as oportunidades de mercado em cada região.

Além de aspectos relacionados à potencialização dos processos de ciclagem de nutrientes, trabalhos de pesquisa têm demonstrado benefícios diferenciais que justificam o investimento em sistemas de produção mais biodiversos, apesar de estes normalmente implicarem em maior complexidade

gerencial. Quando se trata de sistemas rotacionados em lugar da simples sucessão soja/trigo, o SPD resguarda os estoques de matéria orgânica, apresentando maior conteúdo de C e N microbianos até 20 cm de profundidade e mais porosidade visível, além de unidades morfológicas de solo menos compactas e poucas raízes com deformidades (Silva et al., 2014a). O SPD de longa duração confere melhor qualidade física e retenção de água no solo (Calonego et al., 2011; Moraes et al., 2016b), e a introdução de forrageiras em consórcio com milho preserva atributos físicos desejáveis, refletidos na macroporosidade, além da fertilidade química, aumentando a produção da soja subsequente (Crusciol et al. 2015; Pereira et al., 2016).

Em última instância, o efeito do SPD bem conduzido, agregando todos os aspectos aqui comentados, favorece o aumento da eficiência de aproveitamento dos fertilizantes aplicados, em especial dos fosfatados (Sousa et al., 2016), incluindo a maior participação de formas orgânicas como fonte dos nutrientes supridos às plantas. Associada ao SPD, a adoção de práticas de intensificação ecológica deve, preferencialmente, envolver diversidade de espécies (gramíneas e leguminosas) e de arquitetura radicular (fasciculada e pivotante). Plantas de sistema radicular robusto (braquiárias, milheto) contribuem de maneira conveniente para mobilização ascendente e descendente de nutrientes, recuperando aqueles eventualmente deslocados para zonas inferiores, como K, S e B (Braz et al., 2004; Crusciol e Soratto, 2010), e auxiliando na incorporação de outros menos móveis, como P e Ca (Crusciol e Soratto, 2010; Crusciol et al., 2015), além de aportar carbono e estender os benefícios da MOS a camadas mais profundas no perfil (Crusciol e Soratto, 2010; Salton e Tomazi, 2014).

É possível estipular condições que contribuem para reduzir perdas e favorecer a eficiência de uso de fertilizantes nas lavouras. Serão ambientes conservadores de nutrientes, com maior armazenamento ou menor declínio, os solos que associem as seguintes características: relevo plano; textura argilosa; porosidade que permita boa infiltração de água, mas sem drenagem excessiva; teor de matéria orgânica e CTC mais elevados, e perfil sem acidez e com boa disponibilidade de nutrientes. Além disso, quanto mais intensivamente vegetado, com plantas vivas por mais tempo ao longo do ano e presença de espécies com raízes profundas, maior será a capacidade de o sistema captar os nutrientes derivados das adubações e mantê-los em circulação, minimizando a probabilidade de perdas ou indisponibilização. Combinadas essas condições e sendo os processos erosivos devidamente controlados, se estabelecem fluxos de “nutrientes circulantes no sistema”, não havendo remoção significativa, a não ser pela exportação nos produtos colhidos (Resende et al., 2016a).

Fundamentalmente, a conversão de solos tropicais em ambientes de alto potencial produtivo requer um componente de zelo pela qualidade do solo, com investimento em práticas de manejo que, na maioria das vezes, não trazem retorno econômico em curto prazo, porque não geram produtos comercializáveis ou redução imediata de custos. Porém, essa filosofia de trabalho que não despreza a qualidade global do sistema tem assegurado maior estabilidade produtiva e eficiência no uso de insumos em longo prazo. Os solos assim manejados apresentam características ideais para se avançar na aplicação dos preceitos da adubação de restituição e na utilização do balanço de nutrientes como critério para o seu dimensionamento.

IDENTIFICAÇÃO DO STATUS DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA

A forma mais direta para identificar um ambiente de fertilidade construída é por meio da interpretação dos resultados da análise de solo, quando estes se enquadram nos intervalos ou classes que indicam a existência de níveis desejáveis para os indicadores de interesse. É o caso, quando os valores dos atributos se encontram acima dos níveis críticos definidos regionalmente (Quadros 1 a 4), enquadrando-se nos intervalos designados como “Adequado” a “Alto” (ou “Alto” a “Muito alto”, dependendo da literatura consultada). Significa que novas adubações ou o uso de corretivos da acidez se justificarão apenas nas quantidades suficientes para preservar a condição de fertilidade construída para as safras seguintes, uma vez que é baixa a probabilidade de resposta econômica das culturas à aplicação de doses mais elevadas.

Com base no padrão de resposta à disponibilidade de um nutriente, o seu nível crítico costuma ser estabelecido como o teor no solo que proporciona 80 a 90 % da maior produção possível naquele ambiente e, teoricamente, estaria associado à produção de máxima eficiência econômica (Cantarutti et al., 2007; Gatiboni et al., 2016). O valor crítico corresponde ao limite superior do intervalo interpretado como “Médio” na análise do solo, constituindo a meta que se busca superar na fase de construção da fertilidade. Os níveis críticos podem variar regionalmente em função dos extratores utilizados em laboratório, dos tipos de solo e das culturas consideradas, além de outros critérios estipulados por diferentes grupos de pesquisa (Quadros 1 a 4). Uma consulta comparativa aos manuais de recomendação de corretivos e fertilizantes propicia conhecer os condicionantes e critérios de interpretação levados em conta em diferentes regiões, o que pode ser útil para ajustes

de tomada de decisão quando se busca praticar o manejo da fertilidade com maior refinamento técnico.

Os resultados da análise de solo representam uma média da condição de disponibilidade a partir de um conjunto de amostras simples, tomadas em diferentes pontos da lavoura, e a obtenção de um valor similar ao nível crítico significa que em alguns locais a disponibilidade provavelmente se encontra

Quadro 1. Valores de referência para atributos do solo na região do Cerrado, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, acima dos quais se admite a condição de fertilidade construída

Teor de argila	Atributos associados à fertilidade do solo										
	Mat. orgânica	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	B	Cu	Mn	Zn	V
g kg ⁻¹		mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³				%
< 150	10	25	40								
160 a 350	20	20		2,4	1,0	9	0,5	0,8	5,0	1,6	50
360 a 600	30	12	80								
> 600	35	6									

Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich-1. Teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados com o extrator KCl 1 mol L⁻¹. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂ e interpretação considerando a média dos valores obtidos em amostras coletadas nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm. Teor de B determinado por extração com água quente e teores de Cu, Mn e Zn determinados usando o extrator Mehlich-1, com interpretação considerando o pH (água) do solo próximo de 6,0.

Fonte: adaptado de Sousa e Lobato (2004a), Benites et al. (2010).

Quadro 2. Valores de referência para atributos da fertilidade do solo no estado de São Paulo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, acima dos quais se admite a condição de fertilidade construída

Teor de argila	Atributos associados à fertilidade do solo										
	Mat. orgânica	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	B	Cu	Mn	Zn	V
g kg ⁻¹		mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³				%
< 150	15										
160 a 350	16 a 30	20		1,6	7	5	10	0,6	0,8	5,0	1,2
360 a 600	31 a 60										

Teores de P e K determinados com o extrator Resina de Troca Iônica. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com água quente. Teores de Cu, Mn e Zn determinados usando o extrator DTPA.

Fonte: adaptado de van Raij et al. (1996).

Quadro 3. Valores de referência para atributos da fertilidade do solo nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, acima dos quais se admite a condição de fertilidade construída para o cultivo de grãos

Teor de argila	Atributos associados à fertilidade do solo										
	Mat. orgânica	P	K*	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	B	Cu	Mn	Zn	V**
g kg ⁻¹		mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³				%
< 200	25	30	60								
210 a 400	50	18	90	4,0	1,0	5	0,3	0,4	5,0	0,5	80
410 a 600	> 50	12	120								
> 600	–	9	135								

Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich-1. Teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados com o extrator KCl 1 mol L⁻¹. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com água quente. Teores de Cu, Mn e Zn determinados usando o extrator Mehlich-1. *Os níveis críticos de K variam em quatro valores, de 60 a 135 mg dm⁻³, conforme a CTC a pH 7,0 do solo se enquadre nas classes ≤ 7,5; de 7,6 a 15,0; de 15,1 a 30,0, e > 30,0 cmol_c dm⁻³. **Conforme CQFS-RS/SC (2004).

Fonte: adaptado de Silva et al. (2016).

Quadro 4. Valores de referência para atributos da fertilidade do solo no estado do Paraná, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, acima dos quais se admite a condição de fertilidade construída

Teor de argila	Atributos associados à fertilidade do solo										
	Matéria orgânica	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	B	Cu	Mn	Zn	V
g dm ⁻³	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³				%
< 250		18									
250 a 400	24	12	0,21	2,0	1,0	3	0,3	0,8	30,0	1,2	50
> 400		9									

Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich-1. Teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados com o extrator KCl 1 mol L⁻¹. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com cloreto de bário em água quente. Teores de Cu, Mn e Zn determinados usando o extrator Mehlich-1.

Fonte: adaptado de Pauletti e Motta (2017).

aquém do desejável. A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser considerada uma característica intrínseca à atividade agrícola e mesmo as técnicas de agricultura de precisão não permitem atingir homogeneidade plena e permanente (Resende e Coelho, 2017). Cabe frisar que normalmente os níveis críticos reportados na literatura foram determinados sob condições experimentais, em parcelas com controle ambiental mais rigoroso para

assegurar a homogeneidade. Nas lavouras, a variabilidade é imensamente maior, o que justifica todas as preocupações quanto à confiabilidade das amostragens para monitoramento do solo e o objetivo de sempre buscar uma folga, para mais, na disponibilidade detectada nas análises em relação aos níveis críticos.

Nos quadros 1 a 4, são sumarizados os valores de referência de atributos de fertilidade na análise de rotina, que representam limites a partir dos quais se considera um solo com *status* de fertilidade construída, de acordo com a literatura específica para diferentes regiões do País. O diagnóstico depende de uma análise do conjunto desses indicadores, podendo-se agregar outras informações que ajudem a caracterizar melhor o sistema. Muitas vezes, a avaliação de nutrientes isolados revela valores acima dos níveis críticos, o que, em princípio, indicaria fertilidade construída para aqueles atributos. No entanto, a condição do solo pode ser passível de otimização ou melhor equilíbrio se algum outro fator de produção manejável (de ordem nutricional ou não) ainda não estiver adequado. Para tirar maior proveito das conveniências de se trabalhar em solos de fertilidade construída, é preciso investir em qualidade dos diagnósticos, a partir de monitoramento mais frequente do solo e das respostas das culturas, com o devido acompanhamento técnico (Resende et al., 2016a).

Para um diagnóstico consistente, além desses indicadores diretos da fertilidade química, é recomendável levar em conta a condição geral de aptidão da área, baseada nos índices médios de produtividade e estabilidade das últimas safras, no grau de diversificação de espécies, nos indícios de resposta ou não à adubação, nas condições de infiltração e conservação de água, na intensidade relativa de processos de perda de nutrientes, dentre outros aspectos. Enfim, cabe uma avaliação mais ampla, à luz do que foi apresentado nos tópicos anteriores sobre os fatores que, devidamente gerenciados, convergem para o condicionamento de ambientes propícios à adoção de estratégias poupadoras de fertilizantes.

Se numa sequência temporal de análises do solo de uma lavoura, recorrentemente, o valor de disponibilidade de um dado nutriente é interpretado como “Muito alto”, há clara indicação da conveniência de se ajustar, para menos, a quantidade fornecida nas adubações, o que proporciona economia de insumo e menor chance de desperdícios, que inclusive podem implicar em problemas ambientais. Por outro lado, se os valores nas análises estão sempre muito próximos ao nível crítico, é preciso cautela quanto à possibilidade de diminuir a adubação e pode haver vantagem em investir para elevar um pouco mais os teores no solo.

ADUBAÇÃO DE RESTITUIÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA USO EFICIENTE DE NUTRIENTES E ECONOMIA DE FERTILIZANTES EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Pelo exposto até aqui, depreende-se que a dinâmica dos nutrientes aplicados em solos de fertilidade construída varia quanto aos compartimentos e fluxos na relação solo-planta, diferindo das rotas conceituais classicamente consideradas como o comportamento padrão, as quais em geral foram estabelecidas a partir de estudos em áreas de incorporação recente ao cultivo e trabalhadas com preparo convencional do solo. Pode-se esperar que os componentes que atuam como “dreno de nutrientes” num primeiro momento (abertura de área) já estejam mais ou menos saturados nos solos de fertilidade construída, que, ao longo do tempo de cultivo, passam a expressar o seu caráter “fonte de nutrientes” de forma mais pronunciada (Resende et al., 2016a). Esse novo contexto é reflexo também dos diferenciais positivos que o SPD e a diversificação de culturas imprimem em termos de aumento dos estoques, da disponibilidade e do aproveitamento de nutrientes no sistema, incrementando a taxa de desfrute e a eficiência de uso dos fertilizantes (Bayer e Fontoura, 2009; Crusciol e Soratto, 2010; Sousa et al., 2016).

Em princípio, se num sistema construído são minimizadas as perdas por erosão, lixiviação e volatilização, as culturas passam a ser o fator majoritário a influenciar os fluxos de nutrientes e a demanda por novas adubações consistirá essencialmente da reposição do que for exportado nos produtos colhidos. Assim, o solo de fertilidade construída passa a atuar como um reservatório de nutrientes, cuja capacidade máxima é dependente da natureza de seus constituintes (quantidade e tipo de argila, teor de matéria orgânica) e do manejo recebido (ex.: práticas que influenciam a capacidade de troca de cátions – CTC), em que a oscilação do nível de reserva disponível fica mais vinculada ao papel da própria planta como dreno de nutrientes (Figura 3). Têm-se, então, condições propícias para se exercitar a abordagem da adubação de restituição ou de reposição.

É importante enfatizar a diferença entre adubação de manutenção e adubação de restituição, assim como as implicações de se trabalhar com a extração ou a exportação pela cultura como critério de definição da quantidade de fertilizante a aplicar numa dada situação. O total acumulado de determinado nutriente pelas plantas durante um cultivo corresponde à extração daquele nutriente (Quadro 5), enquanto a exportação diz respeito à quantidade que sai

do sistema no produto colhido (Quadro 6), o qual contém uma fração do total acumulado (Quadro 7). Portanto, uma adubação que vise especificamente restituir a exportação demandará menor quantidade de fertilizante.

Nos primeiros anos de exploração agrícola, a necessidade de adubação é fortemente influenciada pelo dreno-solo, acrescida do dreno-planta correspondente à extração, devendo-se incluir ainda fatores de correção

Quadro 5. Valores equivalentes de extração de macro e micronutrientes por cada tonelada de produto colhido de diferentes culturas no Brasil

Macronutrientes						Micronutrientes					
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
kg t ⁻¹ de produto colhido						g t ⁻¹ de produto colhido					
Soja ¹											
78,0	16,0	58,0	22,1	10,7	4,2	82	20	375	198	7	75
Milho grão ²											
28,4	6,3	18,0	5,0	3,8	2,0	18	9	220	63	0,9	45
Feijão ³											
38,8	11,4	40,2	17,7	4,9	4,4	47	15	371	321	-	56
Algodão em caroço ⁴											
70,0	17,0	58,0	22,6	13,7	5,3	120	43	630	72	1	53
Trigo ⁵											
28,0	8,9	23,9	2,4	2,3	3,5	20	6	374	106	-	20
Cevada ⁶											
23,1	7,5	22,3	3,0	2,1	1,6	10	9	189	34	0,7	28
Sorgo granífero ⁷											
38,8	17,4	36,3	12,4	5,2	3,0	72	43	992	269	2,7	98
Sorgo forrageiro ⁸											
15,8	6,1	21,7	5,7	1,9	1,1	14	5	42	71	-	11
Capim braquiária ⁹											
22,5	6,8	36,0	6,0	4,1	2,5	17	7	208	142	0,4	32
Capim mombaça ¹⁰											
25,0	6,8	36,0	8,0	5,0	3,0	10	8	126	13	-	20

¹ Embrapa Soja (não publicado). ² Adaptado de Malavolta et al. (1997) e Resende et al. (2016b). ³ Adaptado de Soratto et al. (2103) e Fernandes et al. (2013). ⁴ Adaptado de Embrapa Algodão (não publicado), Carvalho et al. (2011) e Borin et al. (2015). ⁵ Adaptado de Pauletti e Motta (2017). ⁶ Adaptado de Malavolta (1986), Cantarella et al. (1996) e Franco (2011). ⁷ Adaptado de Franco (2011). ⁸ Adaptado de Bianco et al. (2005), Primavesi et al. (2006), Martha Junior e Vilela (2007), Silva et al. (2009), Monteiro (2010) e Moreira et al. (2013). ⁹ Adaptado de Malavolta et al. (1997) e Martha Junior e Vilela (2007).

Quadro 6. Valores equivalentes de exportação de macro e micronutrientes por cada tonelada de produto colhido para diferentes culturas no Brasil e por tonelada de carne produzida

Macronutrientes						Micronutrientes					
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
kg t ⁻¹ de produto colhido						g t ⁻¹ de produto colhido					
Soja (14 % de umidade) ¹											
54,0	11,0	22,0	2,8	2,5	2,8	31	12	65	39	5	41
Milho grão ²											
14,0	6,0	4,4	0,1	1,1	1,0	5	2	15	5	0,6	18
Milho silagem ³											
11,5	2,6	7,5	2,3	1,7	0,8	10	3	84	25	0,5	18
Feijão ⁴											
25,0	9,1	17,7	2,2	2,0	2,1	23	7	140	116	-	22
Algodão em caroço ⁵											
35,0	11,0	17,0	2,4	7,3	3,2	22	8	104	13	-	28
Trigo ⁶											
20,0	7,3	4,2	0,2	0,8	1,2	3	3	14	13	-	15
Cevada ⁷											
15,6	6,2	6,6	0,4	1,0	0,9	5	5	63	16	0,3	18
Sorgo granífero ⁸											
20,8	12,2	10,3	3,7	2,7	1,4	25	9	23	68	-	28
Sorgo forrageiro ⁹											
15,8	6,1	21,7	5,7	1,9	1,1	14	5	42	71	-	11
Boi de corte ¹⁰											
24,0	19,1	2,4	16,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-

¹ Embrapa Soja (não publicado). ² Adaptado de Malavolta et al. (1997) e Duarte et al. (2017). ³ Adaptado de Malavolta et al. (1997) e Resende et al. (2016c). ⁴ Adaptado de Soratto et al. (2103) e Fernandes et al. (2013). ⁵ Adaptado de Embrapa Algodão (não publicado), Carvalho et al. (2011) e Borin et al. (2015). ^{6,7} Adaptado de Pauletti e Motta (2017). ⁸ Adaptado de Cantarella et al. (1996) e Franco (2011). ⁹ Adaptado de Franco (2011). ¹⁰ Adaptado Humphreys (1991) e Freitas et al. (2003), considerando animais com 500 kg de peso vivo.

de perdas. Por isso, durante a etapa de construção da fertilidade, devem ser empregadas adubações corretivas complementadas pelas adubações de manutenção (Sousa e Lobato, 2004a; De Bona et al., 2016).

Até que o sistema seja estabilizado numa condição desejável de disponibilidade acima dos níveis críticos e controle satisfatório de perdas,

Quadro 7. Proporção do total absorvido de macro e micronutrientes exportada na colheita de diferentes culturas no Brasil

Macronutrientes					Micronutrientes						
N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
% —————											
Soja ¹											
69	71	37	13	24	66	38	58	17	20	71	55
Milho grão ²											
50	67	21	0,7	21	45	28	22	5	7	67	36
Feijão ³											
65	80	44	13	40	48	49	44	38	36	-	40
Algodão ⁴											
50	65	29	11	53	60	18	19	17	18	-	53
Trigo ⁵											
71	82	18	8	35	34	15	48	4	12	-	75
Cevada ⁶											
68	83	30	13	48	56	49	52	33	47	43	62
Sorgo granífero ⁷											
54	70	28	30	52	47	35	21	2	25	-	29

¹ Embrapa Soja (não publicado). ² Adaptado de Malavolta et al. (1997) e Resende et al. (2016b). ³ Adaptado de Soratto et al. (2103) e Fernandes et al. (2013). ⁴ Adaptado de Embrapa Algodão (não publicado), Carvalho et al. (2011) e Borin et al. (2015). ^{5,6} Adaptado de Pauletti e Motta (2017). ⁷ Adaptado de Malavolta (1986), Cantarella et al. (1996) e Franco (2011).

incertezas resultantes de interações entre os referidos drenos e outros fatores desconhecidos ou não controláveis irão dificultar o dimensionamento mais preciso das quantidades de fertilizantes a serem aplicadas em safras sequenciais. O limitado conhecimento sobre o funcionamento do “reservatório solo-palhada” e o destino dos nutrientes fornecidos faz com que, mesmo em solos de alta fertilidade, frequentemente a extração seja utilizada como balizadora para dar margem de segurança às adubações. Essa opção não se justifica quando há um sólido diagnóstico de fertilidade construída, com teores de nutrientes nas classes “Alto” ou “Muito Alto”, casos em que a tomada de decisão mais coerente seria buscar repor somente a exportação, por meio da adubação de restituição.

A filosofia da adubação de restituição não é uma vertente nova no manejo da fertilidade do solo. Conceitualmente, deriva de uma das leis fundamentais da fertilidade estabelecidas ainda no século XIX, a Lei da Restituição, atribuída

a Justus von Liebig, que preconiza o princípio de que os solos precisam ser fertilizados para restaurar as quantidades de nutrientes removidas pelas culturas ou por processos de perdas, de modo que a sua fertilidade se sustente ao longo do tempo (Alvarez V et al., 2014; Reddy, 2016).

Assim, adubação de restituição em solos que preenchem os critérios de fertilidade construída e perdas minimizadas se baseia na conservação do estoque de nutrientes disponíveis no sistema, reabastecendo-o para equilibrar o balanço de entradas via adubação ou outras formas de aporte, e as saídas via produtos colhidos. Portanto, o dimensionamento da adubação de restituição é definido a partir do reconhecimento dessas entradas e saídas.

Esse balanço também é referido como método requerimento-suprimento na relação planta-solo, sendo objeto de estudos mais complexos de modelagem e construção de programas computacionais visando ao aperfeiçoamento dos sistemas tradicionais de tabelas de recomendação (Santos et al., 2002; Cantarutti et al., 2007; Alvarez V et al., 2014). Embora conste em livros textos e manuais de fertilidade do solo como uma das modalidades de adubação, ao que tudo indica, a adubação de restituição ainda não é efetivamente adotada no gerenciamento de lavouras pelos produtores brasileiros, por desconhecimento, por pressão comercial ou, principalmente, por receio de incorrer em perda de produtividade.

No caso do P, considerando o ciclo biogeoquímico global do elemento, o pensamento de vanguarda entre os pesquisadores é que não se pode prescindir de um manejo agrônomo cada vez mais eficiente, tendo em vista tratar-se de um recurso natural não renovável e finito, determinante do potencial de produção agrícola e cuja acumulação descontrolada nos solos predispõe a perdas do sistema que se tornam um fator de desequilíbrio ambiental (Syers et al., 2008).

Juntamente com P, o uso do N nas plantações coloca a agricultura como atividade de forte impacto nos ciclos que governam o equilíbrio natural do planeta. A problemática da desregulação das populações e dos ciclos naturais envolvendo espécies de organismos aquáticos, motivada pelo carreamento por processos erosivos de fosfatos em formas solúveis ou particuladas e pela lixiviação de íons nitrogenados, desperta preocupações em âmbito mundial e, provavelmente, essa questão deverá se tornar relevante também entre os requisitos de sustentabilidade da agricultura brasileira (Riskin et al., 2013; Neill et al., 2013; Riskin et al., 2017) diante das exigências do mercado globalizado de *commodities*.

De acordo com Bouwman et al. (2017), para além do que acontece sob o viés agrônomo no âmbito das propriedades rurais, as paisagens apresentam

uma “memória” de longo prazo resultante do uso agrícola, relacionada a diversos *pools* de N e P. Por isso, os autores enfatizam a necessidade de se desenvolver e adotar práticas de manejo que, conjugadas, promovam ganhos de eficiência no uso desses nutrientes, condição fundamental para o controle e a mitigação de seus potenciais efeitos negativos no ambiente. Para esses objetivos, ganham relevância estratégias de gerenciamento da fertilidade do solo baseadas em adubações de restituição, dimensionadas considerando o sistema de culturas em vez de se trabalhar cada uma isoladamente. Como diversas variáveis, controláveis ou não, afetam a demanda de nutrientes em diferentes situações de solo e de sistemas de produção, as abordagens visando à maior eficiência devem ser sítio-específicas e precisam ser dinâmicas e flexíveis, para serem modificadas conforme variam os condicionantes ao longo de múltiplas estações de cultivo.

Em zonas produtoras dos países desenvolvidos, para os solos com elevado conteúdo de P acumulado, já se preconiza a redução das doses desse nutriente ou mesmo a sua supressão nas adubações, como forma de otimizar o uso de fertilizantes e minimizar os riscos ambientais, haja vista que a utilização unicamente das reservas criadas nos solos nas últimas décadas são suficientes para manter níveis adequados de produtividade por muitos anos (Withers et al., 2018b). Há indicativos de que a conjuntura deverá seguir nesse mesmo sentido em várias regiões produtoras do Brasil, em que a tendência é que, mantidas as taxas de adubação vigentes, os solos de fertilidade construída continuarão acumulando cada vez mais P residual. Essa inferência se aplica a outros nutrientes, inclusive alguns micronutrientes (Moraes et al., 2016a) com diferentes potenciais de acumulação, conforme sua dinâmica no solo e a capacidade dos ambientes de produção em retê-los *in situ*.

Portanto, a aplicação em larga escala dos preceitos da adubação de restituição poderá até mesmo permitir que o País antecipe o alcance de metas de uso racional de fertilizantes (Withers et al., 2018b), prevenindo o surgimento de problemas semelhantes aos enfrentados hoje por produtores no exterior e com vantagens competitivas vinculadas à maior eficiência no uso de nutrientes e à conformidade ambiental, além de ganhos econômicos, notadamente nos casos do N e do P.

É provável que significativa extensão de áreas de culturas anuais no Brasil, bem manejadas e devidamente diagnosticadas como de fertilidade construída, estejam aptas para se implementar a adubação de restituição como forma de ganhar eficiência produtiva global nas propriedades. Essa perspectiva estaria ligada ao aumento na eficiência de uso de fertilizantes,

com possível redução de gastos com adubos, otimizando as taxas de retorno econômico e assegurando a qualidade ambiental, compatibilizadas com a conservação da fertilidade do solo. Embora envolva critérios relativamente simples, essa estratégia pode representar um significativo avanço frente aos procedimentos tradicionais em que predominam dosagens de nutrientes tabeladas, fixas ou pré-estabelecidas, as quais nem sempre se mostram em sintonia com o dinamismo da relação crédito/demanda de nutrientes em sistemas de produção intensificados.

A “produtividade esperada” foi e continuará sendo um dos mais importantes critérios para a definição quantitativa da adubação, mas, dada a condição de maior flexibilidade no manejo de solos de fertilidade construída, ganha relevância a “produtividade realizada”, informação que precisa ser levada em conta como um indicador consistente para guiar o dimensionamento de adubações futuras.

Ainda não é usual incluir a produtividade realizada na safra anterior como critério quantitativo a ser considerado nos protocolos de recomendação de nutrientes. Mas, tem-se aí um subsídio diferencial para aprimorar e dar mais confiabilidade ao gerenciamento da fertilidade, sobretudo num horizonte de longo prazo. No Boletim de Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo, van Raij et al. (1996) afirmavam que, embora o critério de produtividade esperada seja um exercício de adivinhar o futuro, não há melhor alternativa ante as condições de produtividade muito diversa das culturas, sendo melhor errar um pouco para mais, para não deixar de ganhar em anos bons. No caso de solos de fertilidade construída, propõe-se agora olhar também pelo retrovisor, registrando a produtividade alcançada para determinar a exportação de nutrientes, a qual vai indicar a necessidade de reposição para manter a fertilidade nos anos seguintes. Conforme a produtividade auferida para mais ou para menos, se podem identificar déficits ou créditos de nutrientes em relação ao que havia sido fornecido na adubação daquele cultivo, compondo balanços que irão nortear o manejo integrado de nutrientes no sistema de produção.

A vantagem nesse caso é que se tem um controle gerencial da fertilidade do solo muito mais eficaz do que considerar somente a produtividade esperada para delinear um plano de adubação, pois, ao dispor de informações sobre quanto foi exportado na safra anterior, o efeito de anos bons ou ruins pode ser devidamente contabilizado. Num cultivo que teve a produtividade prejudicada, em geral, os nutrientes que deixaram de ser absorvidos/exportados não são perdidos quando se trata de áreas bem manejadas, mas irão compor créditos para o sistema, os quais poderão, ao menos em

parte, ser deduzidos nas adubações posteriores. O raciocínio inverso se aplica quando a produtividade for incrementada por condições favoráveis durante o ciclo, havendo remoção extra de nutrientes via exportação, o que indicará a necessidade de compensação futura.

As tecnologias da agricultura digital compõem um cenário muito promissor para a implementação desses ajustes finos, favorecendo a aplicabilidade do manejo de nutrientes via adubação de restituição, ao permitirem aprimorar diversas etapas, desde amostragens georreferenciadas para diagnóstico da disponibilidade no solo até a tomada de decisão e procedimentos operacionais para a distribuição variável de fertilizantes (Resende et al., 2014). A adoção desse ferramental da agricultura de precisão certamente representará um fator de competitividade aos produtores. O uso de monitores de produtividade nas colhedoras para geração de mapas de colheita facilita a obtenção de dados de exportação de nutrientes de forma expedita, possibilitando a prescrição espacializada e aplicações a taxa variável, para repor as quantidades removidas na colheita em cada parte de uma lavoura. Tem-se, portanto, um caminho aberto para maior racionalidade no uso de fertilizantes, por meio da customização do gerenciamento da fertilidade entre e dentro dos talhões de cultivo.

CICLAGEM E CRÉDITOS DE NUTRIENTES EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Quando é possível contar com uma boa reserva tamponada no solo, conhecer o fluxo de saída de nutrientes na colheita conforme a produtividade obtida é a melhor maneira de saber quanto aplicar para reabastecer o nível de fertilidade e sustentar os índices produtivos do sistema, sem déficits ou desperdícios. Neste caso, se não há perdas expressivas de nutrientes do sistema, tem-se a receita para um círculo virtuoso. No entanto, essa situação ideal certamente não é a regra no campo, em que um grande número de variáveis interfere nas entradas e saídas de nutrientes, dificultando sua quantificação e controle. Talvez por isso, a visão sobre como deve ser posta em prática a adubação de restituição ainda não seja um tópico claramente definido, possivelmente carecendo de aperfeiçoamento de protocolos em bases regionalizadas.

Nas recomendações mais recentes para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, De Bona et al. (2016) indicaram que essa modalidade de adubação pode ser usada apenas quando o teor do nutriente no solo for interpretado como “Muito alto”. Os autores complementam que há

situações em que se pode até mesmo dispensar a aplicação de fertilizantes ou usar somente uma pequena quantidade de P e K na semeadura de culturas mais responsivas, como o milho e o trigo. Se a disponibilidade de nutrientes na análise de solo estiver próxima do limite inferior da classe de interpretação “Muito Alto”, as quantidades a aplicar seriam equivalentes à exportação, mantendo esse procedimento até que o nível de disponibilidade no solo diminua para “Alto”. Atingida essa condição, novamente volta-se para a modalidade de adubação de manutenção, na qual se preconiza repor a exportação mais as perdas de nutrientes do sistema, genericamente estimadas entre 20 e 30 % no SPD. Espera-se que tal protocolo evite gastos desnecessários com fertilizantes e previna eventuais problemas ambientais.

Evidentemente, o posicionamento da condição atual de fertilidade do solo em relação aos valores de referência (Quadros 1 a 4) é o ponto de partida para se adotar a adubação de restituição. Contudo, sabe-se que a qualidade dos resultados de análises é dependente da eficiência dos extratores (Cantarutti et al., 2007), que podem não contabilizar todos os compartimentos ou formas de nutrientes fitodisponíveis (Anghinoni, 2007), notadamente em sistemas de produção conservacionistas, com diversificação de culturas e maiores conteúdos de MOS, cujos compostos orgânicos podem contribuir no suprimento às culturas (Gatiboni et al., 2007; Sousa et al., 2016).

Portanto, o estoque de nutrientes disponíveis nos solos de fertilidade construída não é uma condição estanque e, na realidade, acaba não sendo mensurável precisamente, uma vez que os compartimentos mais prontamente disponíveis determinados pelos métodos habituais de análise de solo apresentam certo equilíbrio dinâmico com outros de disponibilidade intermediária, conforme exemplificado para o P (Figura 2). Além disso, as culturas apresentam distinta capacidade de aproveitamento de nutrientes ao interagirem com o solo. No caso do N, o contexto é ainda mais complexo, devido à inexistência no Brasil de métodos de rotina para quantificação direta de sua disponibilidade, a qual é altamente influenciada pela MOS e pela relação C/N de palhadas (Cantarella, 2007; Bayer e Fontoura, 2009).

Apesar das deficiências quanto à representatividade das amostragens realizadas (Cantarutti et al., 2007; Anghinoni, 2007; Resende e Coelho, 2017) e das limitações dos métodos laboratoriais em refletir fielmente a fitodisponibilidade, a análise periódica do solo ainda é a melhor ferramenta de monitoramento do *status* de fertilidade em resposta às intervenções agrônômicas. Seja com maior ou menor sensibilidade, é indispensável num programa de manejo da fertilidade construída. A análise de solo pode refletir muito bem a oscilação dos teores disponíveis no sistema, no caso de nutrientes de ciclagem mais simples e rápida, como o K. Porém, o faz de forma menos

evidente para outros que apresentam interação intrincada com a matriz do solo ou que fazem parte da estrutura de compostos orgânicos. Por isso, ao lidar com o sistema, deve-se compreender quão reativo ele se mostra frente às adubações, isto é, qual o grau de expressão do seu tamponamento. Aqueles solos mais argilosos, de CTC elevada e, principalmente, com maiores teores de matéria orgânica devem conservar fertilidade estável por mais tempo depois de construída (Figura 3).

Complementarmente aos dados de análises de solo, é preciso ao menos ter uma ideia da quantidade de resíduos vegetais deixados pelas culturas e plantas de cobertura, das concentrações dos nutrientes neles contidos, bem como das taxas de liberação durante a decomposição desses resíduos nas áreas de cultivo. Esses indicadores são essenciais à obtenção de estimativas mais precisas dos créditos no sistema, para que assim possam ser devidamente considerados num programa de adubação.

São notórias, por exemplo, as diferenças de capacidade de produção de biomassa e de velocidade de decomposição dos restos culturais de gramíneas e leguminosas. Num sistema de produção, é ideal que haja alternância entre espécies desses dois grupos, visto que normalmente as primeiras aportam maiores quantidades de resíduos de alta relação C/N, mais resistentes à decomposição. O inverso se aplica ao segundo grupo, de modo que, nesse rodízio, tem-se a combinação de quantidade e qualidade de substratos orgânicos que favorecem a ciclagem de nutrientes, o incremento de C e a formação de MOS (Yagi et al., 2005; Siqueira Neto et al., 2009; Aita et al., 2014; Urquiaga et al., 2014).

A contribuição de plantas de cobertura para a ciclagem e créditos de nutrientes é amplamente variável conforme as características de cada espécie, a região e o ambiente de cultivo, as condições de crescimento e a forma como são manejadas (Silva et al., 2006; Aita et al., 2014; Amado et al., 2014; Silva et al., 2014b). No quadro 8, essas variações são exemplificadas para quatro espécies de cobertura comumente utilizadas em sistemas de produção de grãos. Nota-se que devido à inconstância dos níveis de produção de biomassa, da concentração e do conteúdo de nutrientes, não é possível assumir indicadores padronizados de ciclagem para fins de ajuste das adubações. Diante disso, avaliações para a obtenção de dados locais são recomendáveis aos que buscam subsídios mais consistentes para “calibrar” e tirar proveito dos créditos proporcionados pela inclusão dessas plantas no sistema de produção.

É importante entender também que créditos oriundos da ciclagem, na verdade, são resultado da mobilização de *pools* de nutrientes que fazem parte

Quadro 8. Valores de produção de massa seca (MS), acúmulo e concentração de nutrientes por crotalária (*Crotalaria juncea*) e milheto (*Pennisetum americanum*) no Mato Grosso do Sul, e por ervilhaca (*Vicia sativa* L.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus*) no Rio Grande do Sul, em dois anos agrícolas

Espécie/Ano	MS	N	P	K	Acúmulo						
					Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
kg ha ⁻¹											
Crotalária/2001	9770	169,0	32,2	240,3	96,7	52,8	18,6	0,12	1,30	0,71	0,26
Crotalária/2002	8600	189,0	23,2	223,1	82,3	40,8	13,4	0,09	1,70	0,52	0,21
Milheto/2001	7730	68,5	23,6	193,8	31,7	21,4	11,1	0,05	4,82	0,69	0,23
Milheto/2002	6360	64,0	14,0	170,9	24,0	18,0	5,1	0,04	2,01	0,36	0,16
Ervilhaca/1995	3270	98	15	156	34	9					
Ervilhaca/1996	6490	198	24	239	59	22					
Nabo forrag./1995	4650	110	27	204	85	27					
Nabo forrag./1996	7190	166	17	204	106	42					
Concentração											
kg t ⁻¹											
g t ⁻¹											
Crotalária/2001		17,3	3,3	24,6	9,9	5,4	1,9	12	133	73	27
Crotalária/2002		22,0	2,7	25,9	9,6	4,7	1,6	10	198	60	24
Milheto/2001		8,9	3,1	25,1	4,1	2,8	1,4	6	624	89	30
Milheto/2002		10,1	2,2	26,9	3,8	2,8	0,8	6	316	57	25
Ervilhaca/1995		30,0	4,6	47,7	10,4	2,8					
Ervilhaca/1996		30,5	3,7	36,8	9,1	3,4					
Nabo forrag./1995		23,7	5,8	43,9	18,3	5,8					
Nabo forrag./1996		23,1	2,4	28,4	14,7	5,8					

Fonte: adaptado de Fiorin et al. (1998) e Silva et al. (2006).

dos estoques já existentes no sistema, não representando aportes externos, e se forem continuamente considerados como entradas no balanço levarão ao consumo das reservas, que em algum momento precisarão ser repostas. A exceção, nesse caso, diz respeito à porção do N presente em resíduos de leguminosas que foi de fato incorporada pela FBN, visto que espécies desse grupo também o absorvem do próprio solo, em maior ou menor quantidade. Portanto, em última instância, apenas o N derivado da FBN poderia ser contabilizado como um acréscimo externo ao sistema, tal como uma adubação. Sob essa ótica, o maior valor das plantas de cobertura reside em ativar os processos de ciclagem e manter em circulação os nutrientes estocados no sistema, protegendo-os de processos de perda e indisponibilização, e

tornando-os acessíveis às culturas comerciais. Deste modo, na prática, sua influência no manejo da adubação está relacionada mais ao momento de aplicação dos fertilizantes do que à dose.

No tocante ao papel das culturas principais, é preciso ter em vista que as quantidades de nutrientes extraídas (Quadro 5) e exportadas (Quadro 6), assim como a proporção do absorvido que efetivamente sai do sistema nos produtos colhidos (Quadro 7), variam conforme o nível de produtividade, mas também entre genótipos de uma espécie e em função da disponibilidade de nutrientes no solo (Bender et al., 2013; Resende et al., 2016b), dentre outros fatores que interferem no potencial produtivo. Em geral, condições de menor disponibilidade de nutrientes fazem com que a absorção seja restringida e maior proporção do conteúdo da planta seja direcionada aos grãos, por exemplo. Isso explica a grande amplitude dos valores de extração ou exportação encontrados para uma dada cultura quando se consultam diferentes fontes na literatura.

O milho é um exemplo típico dessa situação, em que são encontradas numerosas referências com os mais diversos índices de extração e exportação de nutrientes. Revisando essa questão, Resende et al. (2012) ressaltaram a tendência de redução nas taxas de exportação de nutrientes (em kg t^{-1} de grãos) reportadas em trabalhos mais recentes, notadamente nos casos do P e do K, o que foi posteriormente confirmado em outros estudos (Duarte et al., 2017; Silva et al., 2018). Alterações nesse sentido sugerem ganhos na eficiência de uso de nutrientes com o passar do tempo, provavelmente como resultado de avanços no melhoramento genético e no manejo geral da cultura. Em contrapartida, as quantidades de nutrientes exportadas por hectare têm aumentado em decorrência do maior potencial produtivo de cultivares modernas, tornando mais frequentes situações de balanços negativos, a exemplo do K na cultura da soja, em certas regiões (Adilson Oliveira Junior – Embrapa Soja, comunicação pessoal).

A exportação também muda de acordo com a finalidade do cultivo, como no caso do milho silagem, em que a planta inteira é retirada da lavoura (Quadro 6), fazendo com que a exportação por hectare quase se equipare à extração. Consequentemente, as lavouras conduzidas com esse propósito requerem atenção redobrada, pois, comparativamente ao milho colhido para grão, necessitam de maior investimento em fertilizantes na adubação de restituição, para que as reservas de nutrientes do sistema não sejam comprometidas (Resende et al. 2016c). O mesmo se aplica ao caso de espécies utilizadas para alimentação animal na forma de forragem fresca ou feno, sendo cortadas rente ao solo, quando então as taxas de

extração (Quadro 5) é que devem ser levadas em conta para estipular as dosagens de restituição.

A atualização de informações das culturas que compõem o sistema de produção é importante porque os dados de exportação vão influenciar diretamente no gasto de fertilizantes na adubação de restituição e no próprio balanço de nutrientes. De todo modo, os restos culturais apresentam quantidades significativas de nutrientes que retornarão como créditos e, assim como sugerido no caso das plantas de cobertura, deve-se trabalhar com indicadores condizentes com a realidade da lavoura a ser gerenciada (Resende et al., 2018), evitando sub ou superestimativas de créditos.

Sem desmerecer referências como as que constam nos quadros 5, 6 e 7, os programas avançados de gerenciamento da adubação de sistemas devem evoluir e, para tanto, precisam contar com um esforço técnico permanente, no sentido de atualizar os parâmetros determinantes das quantidades de adubos consumidas nas lavouras, com ênfase na obtenção de informações para condições locais de solo, clima, culturas e cultivares.

BALANÇO DE NUTRIENTES NA GESTÃO DA FERTILIDADE E NA ADUBAÇÃO DE SISTEMA

Os aspectos discutidos nos tópicos anteriores fomentam a percepção de que os solos de fertilidade construída manejados em SPD apresentam configuração apropriada para que a chamada adubação de sistema seja bem-sucedida. Mais do que a possibilidade de aplicar antecipadamente numa cultura o que será demandado na seguinte ou de flexibilizar a forma de distribuição, a adubação de sistema consiste em manejar eficientemente os nutrientes, haja vista que os efeitos das fertilizações não se esgotam após a colheita, persistindo sua ação residual, além do retorno nos restos culturais de parte do que as plantas absorveram (Ceretta, 2009). Particularidades da interação com o solo ou da demanda pelas culturas fazem com que alguns nutrientes tendam a se acumular mais que outros nos solos de fertilidade construída. Surge aí um desafio gerencial, que é a realização de adubações que assegurem suprimento equilibrado de nutrientes. Por outro lado, surgem também oportunidades para otimizá-las e obter maior eficiência no uso de fertilizantes, priorizando-se a aplicação de fontes e doses de nutrientes que sejam realmente necessárias em cada situação (Resende et al., 2016a).

Nesses moldes, a adubação de sistema é um exercício contínuo de melhoria do entendimento de como cada ambiente de produção reage ao uso

e manejo, levando a decisões mais assertivas que resultem em vantagens ou benefícios aditivos, ao longo do tempo. O primeiro passo é mudar de um programa de manejo tradicional baseado em recomendações tabeladas para uma abordagem mais flexível e dinâmica, na qual, dentre outros critérios, se utiliza a exportação dos cultivos antecessores para ajudar a balizar o dimensionamento do aporte futuro de nutrientes.

Pode-se propor um modelo conceitual no qual as adubações (de restituição) correspondem a entradas de nutrientes que, em sinergia com os créditos existentes, devem ser suficientes para cobrir as saídas via exportação, mantendo o balanço neutro ou equilibrado no sistema (Figura 4). Esse modelo pode ser aplicado a cultivos isolados, mas se encaixa perfeitamente à adubação de sistema, na qual podem ser compatibilizadas conveniências técnicas, operacionais, de fluxo de caixa e de oportunidades de mercado. Isso

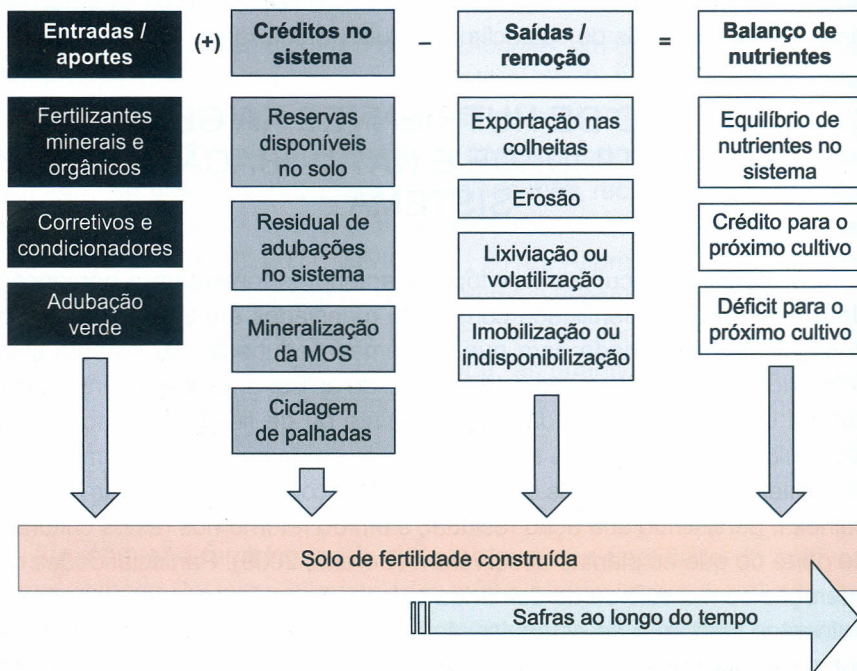


Figura 4. Modelo conceitual para aplicação do balanço de nutrientes no monitoramento nutricional de sistemas de produção de culturas anuais em solos de fertilidade construída. A partir de registros ou estimativas de entradas, créditos e saídas de nutrientes, é possível calcular o balanço e orientar de forma dinâmica a adubação das safras, de modo a manter equilibrada a fertilidade no sistema.

Fonte: elaborada por Álvaro Resende.

é possível quando há observância de critérios para preservar a resiliência do sistema na condição de fertilidade construída, garantindo uma estabilidade produtiva pouco afetada no curto prazo por variantes de manejo.

Dessa forma, busca-se trabalhar da melhor forma possível com créditos, débitos e compensações de nutrientes. Num raciocínio simplificado, se a colheita revela que a exportação foi menor do que a adubação recebida, tem-se então um balanço positivo, um crédito que pode ser contabilizado para ajustar para menos a quantidade de fertilizante a ser aplicada para o cultivo seguinte. Situação oposta se verifica quando a quantidade exportada supera a fornecida, penalizando as reservas do solo, o que requer ajuste para mais na próxima adubação, para que a diferença seja compensada, reequilibrando o sistema.

Como as entradas (adubação) e saídas (exportação) são quantificáveis com razoável segurança para compor o balanço primário, o ponto chave é justamente lidar com os créditos, formados pelas reservas prontamente disponíveis no solo (indicadores da análise do solo), pelos respectivos residuais tamponantes, pelas contribuições da MOS e pelas liberações de nutrientes na ciclagem de palhadas (Figura 4). Esses créditos são o elemento de manobra que vai garantir a estabilidade do sistema quanto ao suprimento de nutrientes às culturas, amortecendo eventuais déficits temporários, ao passo que o próprio tamponamento do ambiente pode assimilar algum excesso nas quantidades fornecidas na adubação, minimizando o risco de perdas.

A perspicácia do gestor agrícola deve se dar exatamente no sentido de manter controle sobre os créditos de nutrientes, tirando proveito ao utilizá-los quando for oportuno, porém sem forçar seu esgotamento. Um exemplo didático diz respeito a uma das vantagens da inclusão da braquiária em sistemas ILP. O capim potencializa a ciclagem de nutrientes, de maneira que as quantidades contidas nas palhadas podem representar expressivo valor fertilizante para atender parte da demanda da cultura sucessora (Santos et al., 2014). Contudo, quando associados a processos de ciclagem, trata-se na verdade de créditos temporários, que definitivamente não podem ser entendidos como entradas de nutrientes a ser deduzidas das adubações (Kaminski et al., 2010) de modo recorrente sem reposição. Como o próprio sentido econômico da palavra já indica, fazer uso de um crédito pressupõe sua finalidade temporária, contando com uma posterior devolução na mesma medida ou a mais. Na produção agrícola, a meta é manter um sistema regulado, sem excedentes ou déficits exagerados de nutrientes.

Nesse intuito, o cálculo do balanço de nutrientes é um procedimento simples, mas indispensável. Associado ao *feeling* sobre o comportamento

dos créditos no sistema, o balanço de nutrientes permite direcionamentos para dimensionar as adubações em curto prazo, a cada safra, aqui entendida como a sequência de culturas de um ano agrícola (ou mesmo a cada cultivo com o aparato de agricultura de precisão), e pode antecipar tendências de déficit ou sobra, possibilitando aprimoramentos no manejo da fertilidade. Paralelamente, é fundamental monitorar o solo por análises periódicas e checar a oscilação de disponibilidade, buscando-se associar tal oscilação ao saldo integralizado de adições e remoções de nutrientes em safras sucessivas. As informações da análise de solo servem assim para confirmar ou reorientar os rumos do manejo numa perspectiva de longo prazo.

Por exemplo, se o teor disponível na análise de solo aumenta com o tempo, em consonância com balanços positivos de um dado nutriente, tem-se indicativo de que aquele ambiente pode funcionar como um bom reservatório e é capaz de manter um *status* de fertilidade mais elevado. Do contrário, se a disponibilidade não acompanha balanços positivos, constata-se que já foi atingido o limite de armazenamento daquele nutriente e que novas aplicações deverão ser vinculadas às exigências das culturas, devendo, eventualmente, a adubação ser mais parcelada para minimizar perdas. Esse seria o caso de solos arenosos, em que o sistema normalmente não consegue reter excedentes (Figura 3) e sua capacidade de suprimento pode ficar aquém da demanda das culturas.

Cálculos de balanço de nutrientes podem ser usados em diferentes contextos, com objetivos distintos. São frequentemente aplicados a partir de dados de experimentos controlados, para fins de discriminação de efeitos de tratamentos de adubação e outros. Há também estimativas mais genéricas de balanço de entradas e saídas na agricultura, com base no confronto de dados estatísticos de consumo de fertilizantes e da produção agrovegetal correspondente, fornecendo taxas de desfrute de nutrientes dadas pela relação entre quantidade exportada/aplicada, no âmbito de países, regiões ou estados (Urquiaga et al., 2014; Cunha et al., 2014, 2018). As informações assim obtidas são de caráter geográfico abrangente e se prestam para comparações regionais e acompanhamento de macrotendências temporais.

De forma mais pontual, a partir dos padrões modais de adubação e de produtividade de culturas selecionadas, em regiões agrícolas ou sistemas mais definidos, pesquisadores têm destacado didaticamente a importância do balanço de nutrientes na gestão da fertilidade, tal como demonstrado por Oliveira Junior et al. (2010), para a soja nos estados do Paraná e de São Paulo, e no Cerrado, e por Kappes (2015), para a sucessão soja/milho safrinha no Mato Grosso. Quando se trabalha com uma adubação fixa,

continuamente repetida numa área, saldos exageradamente positivos ou negativos tendem a ocorrer com o tempo. Estes devem ser reequilibrados com alguma frequência a partir dos balanços, evitando que se acentuem a ponto de desencadear desordens nutricionais por falta ou excesso de algum nutriente, ou que venham a comprometer estoques que deveriam ser mais constantes nos sistemas bem conduzidos.

Desequilíbrios exacerbados levam à perda de estabilidade da condição de fertilidade construída. Por exemplo, balanços deficitários em N são prejudiciais ao forçarem a degradação e a perda do conteúdo de MOS (Urquiaga et al., 2014), com todos os agravantes para a qualidade química, físico-hídrica e biológica do solo. Por sua vez, adubações com dosagens de N acima da capacidade de assimilação pelo sistema solo-planta vão ocasionar descontrole sobre o destino do nutriente, gerando uma maior parcela não recuperável (Wilda, 2018) que favorece os processos de perda, com eventuais consequências econômicas e ambientais negativas. Essa mesma premissa também é válida com relação a aplicações de P e K em excesso.

O balanço de K pode ser critério direto de determinação da quantidade a aplicar do nutriente, visando prevenir sua lixiviação. De acordo com Kaminski et al. (2010), uma vez estabelecido um nível de suficiência no solo, os programas de adubação potássica devem recomendar doses que acompanhem as necessidades das culturas, equivalentes à exportação nos produtos colhidos, o que elimina a chance de sobras de K para translocação e eventual perda no perfil do solo.

A aplicação do balanço, conectado às prescrições de adubação de restituição, se estende a todos os nutrientes, com as devidas ponderações relacionadas às particularidades de cada elemento em termos de comportamento no solo, formas, disponibilidade e efeito residual em sistemas de produção. Especial atenção deve ser dada ao fornecimento compatível daqueles nutrientes que não se acumulam no solo ou quando se trata de ambientes pouco conservadores, para evitar dosagens superestimadas que significam perdas financeiras, dentre outros complicadores já comentados.

Os subsídios mínimos para se calcular e interpretar o balanço primário de nutrientes no âmbito de lavoura são os dados quantitativos das entradas pela aplicação de fertilizantes e das saídas pela remoção nos produtos colhidos, além do conhecimento dos níveis das reservas disponíveis no solo. Estes últimos não entram diretamente no cálculo, mas indicam se há folga ou restrição do sistema para o caso de saldos negativos ocasionais, além de servirem como aferidores de alterações na fertilidade do solo de acordo com tendências temporais de balanços deficitários ou superavitários.

Outros tipos de dados que podem compor elementos de entrada, crédito e saída (Figura 4) devem ser considerados sempre que possível, como itens complementares no balanço de nutrientes, melhorando as inferências a partir dos resultados.

Por exemplo, dados que informem contribuição de N por adubação verde podem ser incluídos diretamente como entrada no cálculo do balanço primário. Dados que indiquem créditos de N oriundos da mineralização da MOS, assim como créditos de K da ciclagem de palhadas, complementam a estimativa do potencial de suprimento durante um ciclo de cultivo e podem dar uma ideia de maior ou menor risco para o sistema no caso de o balanço primário de entradas e saídas resultar em saldo negativo. De modo oposto, a inevitável diminuição do N disponível no sistema pela decomposição de palhadas de alta relação C/N, devido à imobilização, agrava os efeitos de um saldo nulo ou negativo desse nutriente. Portanto, indicadores como esses não podem ser ignorados (Figura 4). Na impossibilidade de obtê-los por medições locais nas condições de cada sistema de produção, devem ser estimados da forma mais coerente ou pelo menos inferidos a partir de dados da literatura.

A título de exemplo, nos quadros 9 a 12, são parametrizados balanços primários de N, P e K para sistemas de produção distintos, em solos de fertilidade construída, referentes a um período de dois anos. Procurou-se utilizar indicadores atualizados de taxas de exportação. Como valores de entradas de nutrientes, foram consideradas as recomendações oficiais de adubação para as culturas, de acordo com as produtividades esperadas. Os valores de produtividades obtidas foram propositalmente equivalentes às produtividades esperadas. Presumiu-se a inexistência de perdas dos nutrientes aplicados.

Pode-se observar que os saldos de nutrientes apurados nos balanços variam entre as culturas, assim como os saldos finais dependem do sistema em questão (Quadros 9 a 12). Os elevados saldos negativos de N em todos os quatro sistemas se devem, sobretudo, aos balanços para a cultura da soja, nos quais a contribuição da FBN, de até 250 kg ha⁻¹ de N (Alves et al., 2003), não foi contabilizada como entrada do nutriente.

Um aspecto a destacar é que as recomendações oficiais não são coincidentes com um balanço neutro para as produtividades projetadas (Quadros 9 a 12). Essa divergência entre as quantidades aplicadas e exportadas é perfeitamente aceitável nos casos em questão, haja vista que as tabelas oficiais de recomendação apresentam indicações genéricas para condições médias de uma grande região.

Quadro 9. Balança teórico de nutrientes no sistema de produção soja/milho segunda safra em solo de fertilidade construída, considerando as recomendações oficiais de adubação para o Cerrado e dois anos agrícolas (A e B)

Componentes do balanço	Indicadores		
Dados da análise de solo (0-20 cm)	MOS	P Mehlich-1	K
“Fertilidade construída”	g kg ⁻¹	— mg dm ⁻³ —	
Solo Textura Média-Argilosa (Sousa e Lobato, 2004a)	> 30	> 20	> 80
Taxas de exportação	N	P₂O₅	K₂O
	— kg t ⁻¹ —		
Soja (Embrapa Soja, não publicado)	54,0	11,0	22,0
Milho (Duarte et al., 2017)	14,0	6,0	4,5
Adubação (doses totais)	N	P₂O₅	K₂O
	— kg ha ⁻¹ —		
Soja A – 4 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	0	40	50
Milho A – 8 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	100	40	70
Soja B – 4 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	0	40	50
Milho B – 8 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	100	40	70
Sistema	200	160	240
Produtividades obtidas	sc ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Soja A	67	4,0	
Milho A	133	8,0	
Soja B	67	4,0	
Milho B	133	8,0	
Exportação de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	— kg ha ⁻¹ —		
Soja A	217	44	88
Milho A	112	48	36
Soja B	217	44	88
Milho B	112	48	36
Sistema	658	184	249
Balanço de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	— kg ha ⁻¹ —		
Soja A	-217	-4	-38
Milho A	-12	-8	34
Soja B	-217	-4	-38
Milho B	-12	-8	34
Sistema	-458*	-24	-9

* Não considerando os créditos da matéria orgânica para o milho, estimados em 12 kg ha⁻¹ de N para cada 1 % de MOS (Fontoura e Bayer, 2008) e a contribuição da fixação biológica de N na soja, de até 250 kg ha⁻¹ de N (Alves et al., 2003).

Quadro 10. Balanço teórico de nutrientes no sistema de produção soja/ algodão segunda safra em solo de fertilidade construída, considerando as recomendações oficiais de adubação para o Cerrado e dois anos agrícolas (A e B)

Componentes do balanço	Indicadores		
Dados da análise de solo (0-20 cm)	MOS	P Mehlich-1	K
"Fertilidade construída"	g kg ⁻¹	— mg dm ⁻³ —	
Solo Textura Média-Argilosa (Sousa e Lobato, 2004a)	> 30	> 20	> 80
Taxas de exportação	N	P₂O₅	K₂O
	— kg t ⁻¹ —		
Soja (Embrapa Soja, não publicado)	54,0	11,0	22,0
Algodão (Embrapa Algodão, não publicado)	35,0	11,0	17,0
Adubação (doses totais)	N	P₂O₅	K₂O
	— kg ha ⁻¹ —		
Soja A – 4 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	0	40	50
Algodão A – 280 @ ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	100	42	34
Soja B – 4 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	0	40	50
Algodão B – 280 @ ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	100	42	34
Sistema	200	164	168
Produtividades obtidas	sc ou @ ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Soja A (sc ha ⁻¹)	67	4,0	
Algodão A (@ ha ⁻¹)	280	4,2	
Soja B (sc ha ⁻¹)	67	4,0	
Algodão B (@ ha ⁻¹)	280	4,2	
Exportação de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	— kg ha ⁻¹ —		
Soja A	217	44	88
Algodão A	147	46	71
Soja B	217	44	88
Algodão B	147	46	71
Sistema	728	180	320
Balanço de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	— kg ha ⁻¹ —		
Soja A	-217	-4	-38
Algodão A	-47	-4	-37
Soja B	-217	-4	-38
Algodão B	-47	-4	-37
Sistema	-528*	-16	-150

* Não considerando os créditos da matéria orgânica, estimados em 12 kg ha⁻¹ de N para cada 1 % de MOS (Fontoura e Bayer, 2008) e a contribuição da fixação biológica de N na soja, de até 250 kg ha⁻¹ de N (Alves et al., 2003).

Quadro 11. Balanço teórico de nutrientes em sistema de produção ILP com soja/milho segunda safra consorciado com braquiária/gado de corte em solo de fertilidade construída, considerando as recomendações oficiais de adubação para o Cerrado e dois anos agrícolas (A e B)

Componentes do balanço	Indicadores		
Dados da análise de solo (0-20 cm)	MOS	P Mehlich-1	K
"Fertilidade construída"	g kg ⁻¹	— mg dm ⁻³ —	
Solo Textura Média-Argilosa (Sousa e Lobato, 2004a)	> 30	> 20	> 80
Taxas de exportação	N	P₂O₅	K₂O
	kg t ⁻¹		
Soja (Embrapa Soja, não publicado)	54,0	11,0	22,0
Milho (Duarte et al., 2017)	14,0	6,0	4,5
Gado de corte (Humphreys, 1991; Freitas et al., 2003)	24,0	19,1	2,4
Adubação (doses totais)	N	P₂O₅	K₂O
	kg ha ⁻¹		
Soja A – 4 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	0	40	50
Milho A – 8 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	100	40	70
Pastagem A – 3 t ha ⁻¹ MS (Alves et al., 2013)	0	0	0
Soja B – 4 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	0	40	50
Milho B – 8 t ha ⁻¹ (Sousa e Lobato, 2004a)	100	40	70
Pastagem B – 3 t ha ⁻¹ (Alves et al., 2013)	0	0	0
Sistema	200	160	240
Produtividades obtidas	sc ou @ ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Soja A (sc ha ⁻¹)	67	4,0	
Milho A (sc ha ⁻¹)	133	8,0	
Gado de corte A (@ ha ⁻¹)	8	0,24	
Soja B (sc ha ⁻¹)	67	4,0	
Milho B (sc ha ⁻¹)	133	8,0	
Gado de corte B (@ ha ⁻¹)	8	0,24	
Exportação de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	kg ha ⁻¹		
Soja A	217	44	88
Milho A	112	48	36
Gado de corte A	5,8	4,6	0,6
Soja B	217	44	88
Milho B	112	48	36
Gado de corte B	5,8	4,6	0,6
Sistema	670	193	249

Quadro 11. Cont.

Componentes do balanço	Indicadores		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Balanço de nutrientes	kg ha ⁻¹		
Soja A	-217	-4	-38
Milho A	-12	-8	34
Gado de corte A	-5,8	-4,6	-0,6
Soja B	-217	-4	-38
Milho B	-12	-8	34
Gado de corte B	-5,8	-4,6	-0,6
Sistema	-470*	-33	-9

* Não considerando os créditos da matéria orgânica para o milho, estimados em 12 kg ha⁻¹ de N para cada 1 % de MOS (Fontoura e Bayer, 2008) e a contribuição da fixação biológica de N na soja, de até 250 kg ha⁻¹ de N (Alves et al., 2003).

Embora fictícias, as situações expostas evidenciam que há grande oportunidade para ganhos de eficiência quando se dispõe de informações derivadas desse tipo de exercício empregando dados reais de manejo da adubação e de desempenho produtivo de uma lavoura. Ao integrar as taxas de exportação elegidas e as produtividades que resultam da influência conjunta de todos os fatores atuantes em cada ambiente de cultivo, o cálculo do balanço pode sinalizar quão equilibradas estão as quantidades de fertilizantes utilizadas em relação à demanda de nutrientes do sistema. Trata-se, portanto, de uma condição ímpar de customização de diagnósticos e prognósticos em apoio ao gerenciamento dos solos de fertilidade construída.

Três dos balanços detalhados trazem um comparativo de modelos representativos de sistemas envolvendo a soja como cultura de verão na região do Cerrado. A modalidade soja/milho safrinha (Quadro 9) é a mais comum e os saldos de N, P e K, para dois anos agrícolas, diferem largamente dos obtidos para a sucessão soja/algodão safrinha (Quadro 10). Pode-se visualizar que o balanço pode ser afetado, tanto por variações nas adubações, conforme a recomendação seguida, quanto por mudanças na magnitude das taxas de exportação adotadas para as culturas que compõem cada sistema.

Por outro lado, na comparação das opções soja/milho safrinha (Quadro 9) e soja/milho safrinha + braquiária em ILP (Quadro 11), verifica-se que o componente animal, que vai se alimentar da pastagem durante pouco mais de dois meses, na entressafra, tem interferência pequena no balanço do sistema. Isso ocorre porque a maior parte dos nutrientes consumidos pelo gado é reciclada, retornando ao solo pelas fezes e urina (Braz et al., 2002; Rotz et al., 2005; Teixeira, 2010), embora a distribuição espacial seja errática,

Quadro 12. Balanço teórico de nutrientes em sistema de produção com ervilhaca/milho verão/trigo/soja verão em solo de fertilidade construída, considerando as recomendações oficiais de adubação e calagem para o estado do Paraná e dois anos (A e B) de um esquema de rotação

Componentes do balanço	Indicadores		
Dados da análise de solo (0-20 cm)	MOS	P Mehlich-1	K
"Solo de fertilidade construída"	g kg ⁻¹	— mg dm ⁻³ —	
Textura: 250-400 g dm ⁻³ argila (Pauletti e Motta, 2017)	> 24	> 12	> 82
Taxas de exportação	N	P₂O₅	K₂O
	kg t ⁻¹		
Milho (Pauletti e Motta, 2017)	14,4	7,8	6,5
Soja (Pauletti e Motta, 2017)	47,1	10,3	17,0
Trigo (Pauletti e Motta, 2017)	20,0	7,3	4,2
Adubação (doses totais)	N	P₂O₅	K₂O
	kg ha ⁻¹		
Ervilhaca A – 2,0 t ha ⁻¹ de MS	0	0	0
Milho A – 14,5 t ha ⁻¹ (Pauletti e Motta, 2017)	160	100	85
Trigo B – 4,0 t ha ⁻¹ (Pauletti e Motta, 2017)	105	45	35
Soja B – 4,5 t ha ⁻¹ (Pauletti e Motta, 2017)	0	70	70
Sistema	265	215	190
Produtividades obtidas	sc ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Milho A	242	14,5	
Trigo B	67	4,0	
Soja B	75	4,5	
Exportação de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	kg ha ⁻¹		
Milho A	209	113	94
Trigo B	80	29	17
Soja B	212	46	77
Sistema	501	188	188
Balanço de nutrientes	N	P₂O₅	K₂O
	kg ha ⁻¹		
Milho A	-49	-13	-9
Trigo B	25	16	18
Soja B	-212	24	-7
Sistema	-236*	27	2

* Considerando um crédito de 60 kg ha⁻¹ de N da ervilhaca como cultura antecessora, já deduzido da adubação do milho. Não considerando os créditos da matéria orgânica para o milho, estimados em 12 kg ha⁻¹ de N para cada 1 % de MOS (Fontoura e Bayer, 2008) e a contribuição da fixação biológica de N na soja, de até 250 kg ha⁻¹ de N (Alves et al., 2003).

com parte expressiva dos dejetos concentrada próxima aos locais de repouso, alimentação e dessedentação dos animais.

Por fim, no quadro 12, é apresentado o balanço para um esquema de rotação no Paraná, envolvendo a sequência ervilhaca/milho verão/trigo/soja verão. Nesse caso, chama-se a atenção para o papel da cultura leguminosa antecessora ao milho, que possibilita um aporte de cerca de 60 kg ha⁻¹ de N, deduzidos da adubação desta. Nessa condição, de acordo com a recomendação calibrada para aquele estado, é possível produzir 14,5 t ha⁻¹ de grãos fornecendo-se apenas 160 kg ha⁻¹ de N via fertilizante (Pauletti e Motta, 2017), o que corresponde a uma substancial economia. Observa-se ainda que o balanço na cultura do trigo deixa saldo positivo dos três nutrientes para o sistema.

Essa lógica do balanço de nutrientes transposta para o nível de talhão, que deveria tornar-se uma rotina gerencial, ainda é relativamente pouco empregada pelos técnicos responsáveis por programas de adubação nas propriedades agrícolas. As situações aqui exemplificadas hipoteticamente dão ideia da gama de condicionantes que podem afetar o balanço de nutrientes entre talhões e revelam que, na maioria das vezes, o manejo da fertilidade é realizado nas propriedades sem que se tenha noção clara do grau de alinhamento das adubações com o que seria a demanda efetiva do sistema.

A preconizada intensificação do uso do solo com diversidade de espécies em SPD vem modificando os fluxos e requerimentos de nutrientes, e aumentando a frequência das colheitas, o que exige entradas proporcionais para restituir as exportações. A presença de plantas vivas durante a maior parte do tempo mantém mais ativos os processos de ciclagem, influenciando nos créditos de nutrientes. Diante dessa complexidade dinâmica dos sistemas, a passividade e a acomodação dos tomadores de decisão leva à perda de competitividade. Os solos de fertilidade construída representam novos horizontes para avanços no manejo de sistemas agrícolas modernos e o produtor brasileiro não pode ficar à margem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

A intensificação do uso do solo é uma necessidade frente à demanda crescente de aumento da produção agrícola em âmbito mundial, para o abastecimento alimentar da população nas próximas décadas. No Brasil, essa pressão é ainda maior, tendo em vista que é uma das poucas regiões do globo onde ainda há espaço para alguma expansão de fronteira agrícola,

concomitante à possibilidade de incrementos significativos na produtividade média das culturas. A base para esse desenvolvimento projetado passa, sem dúvida, pelo condicionamento da acidez e da disponibilidade de nutrientes dos solos tropicais.

Nas regiões agrícolas já consolidadas no País, as adubações e aplicações de corretivos ao longo de décadas de cultivo, associadas à adoção do plantio direto, deixaram um residual que elevou a disponibilidade de nutrientes a valores acima dos níveis críticos em muitas áreas, dando origem aos chamados solos de fertilidade construída. Em ambientes com essa característica, a dinâmica dos nutrientes e os padrões de resposta das culturas à adubação se modificam, exigindo que se evolua no seu entendimento para que as tecnologias de manejo possam ser aprimoradas em prol da sustentabilidade produtiva, econômica e ambiental da agricultura.

Um questionamento que surge quando se discute a possibilidade de se usufruir das reservas de nutrientes criadas nos solos de fertilidade construída diz respeito às dificuldades em estimar com precisão o tamanho de tais reservas e por quanto tempo serão suficientes para suprir parte ou a totalidade do requerimento nutricional das culturas. De fato, ainda não se consegue tal precisão com o ferramental tecnológico de avaliações a campo e métodos laboratoriais de rotina disponíveis para o monitoramento da fertilidade. A principal razão disto é que os compartimentos dos nutrientes presentes no solo, mensuráveis pelos procedimentos convencionais, podem não representar fielmente as frações que estarão disponíveis para a absorção vegetal ao longo do tempo e normalmente não permitem ter uma dimensão mais exata de quão tamponado é o sistema.

Apesar disso, pode-se admitir que praticamente todos os nutrientes estão presentes no solo em diferentes compartimentos, sendo uma parte imediatamente disponível para absorção radicular (ex.: íons em solução) e outra parte em formas de disponibilidade intermediária até as mais recalitrantes (ex.: íons adsorvidos aos coloides ou constituintes de compostos minerais ou orgânicos, de menor ou maior estabilidade). De todo modo, existe um fluxo de reabastecimento à medida que as plantas absorvem nutrientes da solução do solo, pelo qual mesmo as frações de liberação muito lenta são funcionais em contribuir para esse fluxo, caracterizando o tamponamento do sistema. Este tende a aumentar à medida que se materializa o SPD com qualidade química, físico-hídrica e biológica, condição alcançada somente por meio da intensificação e da diversificação de culturas.

Talhões com elevados teores de nutrientes representam uma reserva para o produtor, que pode ser manipulada com melhores ajustes técnicos e

de custo, conciliando maior receita líquida, uso mais eficiente de fertilizantes e redução de riscos ao ambiente. O solo de fertilidade construída constitui uma poupança que precisa ser gerenciada, recebendo aplicações e retiradas, na forma e nos momentos mais convenientes ao sistema de produção e ao produtor.

Lavouras com fertilidade construída, em solos de textura média a argilosa sob SPD, podem, durante algum tempo, manter os mesmos patamares de produtividade e maior retorno econômico utilizando menores quantidades de fertilizantes do que seria a adubação habitual. Há situações em que é possível estabelecer uma estratégia variável na aquisição de fertilizantes, utilizando-se as reservas do solo nos momentos de alta de custo dos adubos ou baixo preço de venda dos grãos e recompondo-as quando as cotações forem mais favoráveis (Resende et al., 2016a).

O ajuste fino do manejo da adubação em solos de fertilidade construída é dependente do registro das entradas de nutrientes via adubação e das saídas pela exportação nos produtos colhidos, para um balanço periódico de excedentes ou déficits, buscando manter o equilíbrio ao longo do tempo. Além disso, requer a compreensão dos processos de ciclagem que modificam os créditos de nutrientes a partir das diferentes espécies que compõem os sistemas de produção, o que, obviamente, varia conforme a região e mesmo entre diferentes propriedades ou talhões num dado ambiente edafoclimático. O balanço de nutrientes como abordagem para o dimensionamento e o manejo das adubações deve ser utilizado agregando-se critérios que levem em conta variáveis e fatores condicionantes em âmbito local. Portanto, configura-se como uma ferramenta que permite customizar de forma mais conveniente o manejo da fertilidade de acordo com o perfil de cada área de cultivo.

A adubação de restituição dos nutrientes exportados, como estratégia para ganhar eficiência no manejo dos solos de fertilidade construída, ainda é pouco usual entre os produtores. Mas à medida que se concretizem casos de sucesso, estes contribuirão para aumentar a confiança dos técnicos, possibilitando a ampliação de escala nas regiões e perfis mais aptos.

Além de beneficiar diretamente o produtor, o manejo integrado de nutrientes pela adubação de restituição, com lastro no balanço de nutrientes por talhão, representará um expressivo avanço tecnológico para o Brasil, ao diminuir as vulnerabilidades frente à dependência de importação de fertilizantes e questões ambientais relacionadas aos nutrientes.

O baixo aproveitamento pelas culturas e, principalmente, o eventual desperdício de nutrientes em decorrência de adubações mal dimensionadas

são luxos aos quais os produtores brasileiros não podem mais se dar. As ciências agrárias delinearam os meios para o condicionamento da fertilidade do solo e foram desenvolvidas práticas agrícolas que aumentam sobremaneira a eficiência de uso de fertilizantes em ambientes tropicais.

O próximo passo certamente envolve a aplicação do manejo integrado de nutrientes, no caso, as adubações de restituição aferidas pelo balanço de nutrientes em solos de fertilidade construída. Trata-se de um movimento estratégico para aliar desempenho agrônômico, uso eficiente e responsável dos recursos naturais (solo e água) e insumos, com maior sustentabilidade econômica e ambiental. Buscar essa meta é uma forma proativa de cientistas, técnicos e produtores fortalecerem o País para lidar com a insuficiência de fontes locais de nutrientes, a volatilidade de preço dos fertilizantes, o alto custo de outros insumos, a pressão pela qualidade ambiental e o mercado globalizado, forças que regem a viabilidade do agronegócio.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Processo: 422538/2016-7) e à Fundação Agrisus (Processo: 2484/18), pelo suporte financeiro às pesquisas envolvendo intensificação de sistemas de produção e adubação em solos de fertilidade construída.

REFERÊNCIAS

- Abreu CA, Lopes AS, Santos G. Micronutrientes. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 645-736.
- Aita C, Giacomini SJ, Ceretta CA. Decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos culturais de adubos verdes. In: Lima Filho OF, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD, editores. Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília, DF: Embrapa; 2014. v. 1. p. 225-64.
- Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2012. (ESA Working Paper No. 12-03).
- Alvarez V VH, Santos AF, Santos GLAA, Matta PM. Fertilização de plantas ornamentais pelo método requerimento-suprimento: proposição de técnica experimental. Rev Bras Cienc Solo. 2014;38:532-43.
- Alves BJR, Boddey RM, Urquiaga S. The success of BNF in soybean in Brazil. Plant Soil. 2003;252:1-9.
- Alves VB, Padilha NS, Garcia RA, Ceccon G. Milho safrinha consorciado com *Urochloa ruziziensis* e produtividade da soja em sucessão. Rev Bras Milho Sorgo. 2013;12:280-92.

Amado TJC, Fiorin JE, Arns U, Nicoloso RS, Ferreira AO. Adubação verde na produção de grãos e no sistema plantio direto. In: Lima Filho OF, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD, editores. Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília, DF: Embrapa; 2014. v. 2. p. 81-125.

Andrade RS, Stone LF, Silveira PM. Plantas de cobertura e qualidade física do solo. In: Silveira PM, Stone LF, editores. Plantas de cobertura dos solos do Cerrado. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão; 2010. p. 163-80.

Anghinoni I. Adubação fosfatada e potássica em plantio direto. In: Fontoura SMV, Bayer C, editores. Manejo e fertilidade de solos em plantio direto. 2. ed. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária; 2009. p. 91-109.

Anghinoni I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 873-928.

Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA. Principais indicadores do setor de fertilizantes. São Paulo: ANDA; 2018 [acesso 17 nov 2018]. Disponível em: http://anda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/Principais_Indicadores_2018.pdf.

Babujia LC, Hungria M, Franchini JC, Brookes PC. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biol Biochem.* 2010;42:2174-81.

Bayer C, Fontoura SMV. Dinâmica do nitrogênio no solo, pré-culturas e manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho em plantio direto. In: Fontoura SMV, Bayer C, editores. Manejo e fertilidade de solos em plantio direto. 2. ed. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária; 2009. p. 61-89.

Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A, Dieckow J. Carbon sequestration in two brazilian cerrado soils under no-till. *Soil Till Res.* 2006;86:237-45.

Bender RR, Haegele JW, Ruffo ML, Below FE. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agron J.* 2013;105:161-70.

Bianco S, Tonhão MAR, Pitelli RA. Crescimento e nutrição mineral de capim-braquiária. *Planta Daninha.* 2005;23:423-8.

Borin ALDC, Carvalho MCS, Ferreira GB. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: Freire EC, editor. Algodão no Cerrado do Brasil. 3. ed. Brasília, DF: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão; 2015. p. 485-531.

Borkert CM, Castro C, Oliveira FA, Klepker D, Oliveira Junior A. O potássio na cultura da soja. In: Yamada T, Roberts T, editores. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Potafos; 2005. p. 671-722.

Bouwman AF, Beusen AHW, Lassaletta L, van Apeldoorn DF, van Grinsven HJM, Zhang J, van Ittersum MK. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Sci Rep.* 2017;7:40366.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC - Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. Brasília, DF: MAPA/ACS; 2012.

Braz AJBP, Silveira PM, Kliemann HJ, Zimmermann FJP. Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e mombaça. *Pesq Agropec Trop.* 2004;34:83-7.

Braz SP, Nascimento Junior D, Cantarutti RB, Regazzi AJ, Martins CE, Fonseca DM, Barbosa RA. Aspectos quantitativos do processo de reciclagem de nutrientes pelas fezes de bovinos sob pastejo em pastagem de *Brachiaria decumbens* na Zona da Mata de Minas Gerais. Rev Bras Zootecn. 2002;31:858-65.

Caires EF, Joris HAW, Churka S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. Soil Use Manage. 2011;27:45-53.

Calonego JC, Borghi E, Crusciol CAC. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. Rev Bras Cienc Solo. 2011;35:2183-90.

Canellas LP, Mendonça ES, Dobbss LB, Baldotto MA, Velloso ACX, Santos GA, Amaral NMB. Reações da matéria orgânica. In: Santos GA, Silva LS, Canellas LP, Camargo FAO, editores. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole; 2008. p. 45-63.

Cantarella H. Nitrogênio. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 375-470.

Cantarella H, van Raij B, Camargo CEO. Cereais. In: van Raij B, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC, editores. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC; 1996. p. 43-71. (Boletim técnico, 100).

Cantarutti RB, Barros NF, Martinez HEP, Novais RF. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 769-850.

Carvalho MCS, Ferreira GB, Staut LA. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: Freire EC, editor. Algodão no Cerrado do Brasil. 2. ed. Brasília, DF: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão; 2011. p. 677-752.

Ceretta CA. Adubação em sistemas de culturas no plantio direto. In: Fontoura SMV, Bayer C, editores. Manejo e fertilidade de solos em plantio direto. 2. ed. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária; 2009. p. 111-28.

Comissão de Química e Fertilidade do Solo - CQFS-RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul/Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2004.

Corbeels M, Marchão RL, Neto MS, Ferreira EG, Madari BE, Scopel E, Brito OR. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. Sci Rep. 2016;6:21450.

Crusciol CAC, Nascente AS, Borghi E, Soratto RP, Martins PO. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. Agron J. 2015;107:2271-80.

Crusciol CAC, Soratto RP. Sistemas de produção e eficiência agrônômica de fertilizantes. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, editores. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Contexto mundial e práticas de suporte. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2010. v. 1. p. 229-75.

Cruz AC, Pereira FS, Figueiredo VS. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. BNDES Setorial. 2017;45:137-87.

- Cunha JF, Francisco EAB, Casarin V, Prochnow LI. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira - 2009 a 2012. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2014. p. 1-13. (Informações Agronômicas, 145).
- Cunha JF, Francisco EAB, Prochnow LI. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 2013 a 2016. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2018. p. 3-14. (Informações Agronômicas, 162).
- De Bona FD, Escosteguy PAV, Sousa RO, Silva LS, Gatiboni LC. Grãos. In: Silva LS, Gatiboni LC, Anghinoni I, Sousa RO, editores. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2016. p. 101-34.
- Duarte AP, Cantarella H, Kappes C. Adubação de sistemas produtivos: milho safrinha e soja. In: Paes MC, editor. Construindo sistemas de produção sustentáveis e rentáveis: palestras do XIV Seminário Nacional de Milho Safrinha. Sete Lagoas: ABMS; 2017. p. 173-95.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa; 2018.
- Fernandes AM, Soratto RP, Santos LA. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: II - micronutrientes. *Rev Bras Cienc Solo*. 2013;37:1043-56.
- Florin JE, Canal IN, Campos BC. Fertilidade do solo. In: Campos BC, editor. A cultura do milho no plantio direto. Cruz Alta: Fundacep Fecotrig; 1998. p. 15-54.
- Fontoura SMV, Bayer C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária; 2008.
- Fontoura SMV, Vieira RCB, Bayer C, Ernani PR, Moraes RP. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em latossolo sob plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo*. 2010;34:1907-14.
- Fontoura SMV, Vieira RCB, Bayer C, Viero F, Anghinoni I, Moraes RP. Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária; 2015.
- Franco AAN. Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo [dissertação]. Janaúba: Universidade Estadual de Montes Claros; 2011.
- Freitas JA, Soares JE, Fontes CAA, Lana PP, Souza JC, Rodriguez LRR, Resende FD. Composição corporal de macronutrientes minerais em bovinos e bubalinos em confinamento. *Arch Vet Sci*. 2003;8:99-107.
- Galvão EZ. Micronutrientes. In: Sousa DMG, Lobato E, editores. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados; 2004. p. 185-226.
- Gatiboni LC, Kaminski J, Rheinheimer DS, Flores JPC. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007;31:691-9.
- Gatiboni LC, Silva LS, Anghinoni I. Diagnóstico da fertilidade do solo e recomendação da adubação. In: Silva LS, Gatiboni LC, Anghinoni I, Sousa RO, editores. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2016. p. 89-99.
- Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Aust J Soil Res*. 2005;43:189-202.

- Humphreys LR. Tropical pastures utilization. Cambridge: Cambridge University Press; 1991.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Censo demográfico: séries históricas. Brasília, DF: IBGE; 2018 [acesso 19 nov 2018]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/22827-censo-2020-censo4.html?=&t=series-historicas>.
- Kaminski J, Moterle DF, Rheinheimer DS, Gatiboni LC, Brunetto G. Potassium availability in a Hapludalf soil under long term fertilization. *Rev Bras Cienc Solo*. 2010;34:783-91.
- Kappes C. Inserção do milho safrinha em sistemas de produção no Mato Grosso. In: Fundação Mato Grosso, editor. Boletim de Pesquisa 2015/2016. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta; 2015. p. 136-73.
- Kappes C, Zancanaro L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção no Mato Grosso. In: Karam D, Magalhães PC, editores. Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global. Sete Lagoas: ABMS; 2014. p. 358-81.
- Lacerda JJJ, Resende AV, Furtini Neto AE, Hickmann C, Conceição OP. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. *Pesq Agropec Bras*. 2015;50:769-78.
- Lopes AAC, Sousa DMG, Chaer GM, Reis Junior FB, Goedert WJ, Mendes IC. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Sci Soc Am J*. 2013;77:461-72.
- Lopes AS, Guilherme LRG. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. *Adv Agron*. 2017;137:1-72.
- Lopes AS, Guilherme LRG. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 1-64.
- Lopes AS, Wietholter S, Guilherme LRG, Silva CA. Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos; 2004.
- Lopes MA. Escolhas estratégicas para o agronegócio brasileiro. *Rev Política Agrícola*. 2017;26:151-4.
- Malavolta E. Micronutrientes na adubação. Paulínia: Nutriplant; 1986.
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos; 1997.
- Martha Junior GB, Vilela L. Uso de fertilizantes em pastagens. In: Martha Junior GB, Vilela L, Sousa DMG, editores. Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens. Planaltina: Embrapa Cerrados; 2007. p. 43-68.
- Miranda EE. Potência agrícola e ambiental: áreas cultivadas no Brasil e no Mundo. *Agroanalysis*. 2018;38:25-7.
- Miranda EE. Meio ambiente: a salvação pela lavoura. *Cienc Cult*. 2017;69:38-44.
- Miranda LN, Miranda JCC, Rein TA, Gomes AC. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. *Pesq Agropec Bras*. 2005;40:563-72.
- Monteiro FA. Pastagens. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, editores. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: culturas. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2010. v. 3. p. 231-85.

- Moraes MF, Santos CLR, Teixeira WWR, Prado MRV, Silva JG, Melo SP. Manejo de micronutrientes na região de Cerrado. In: Flores RA, Cunha PP, editores. Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado. Goiânia: Gráfica UFG; 2016a. p. 411-45.
- Moraes MT, Debiasi H, Carlesso R, Franchini JC, Silva VR, Luz FB. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil Till Res.* 2016b;155:351-62.
- Moreira JFM, Costa KAP, Severiano EC, Simon GA, Cruvinel WS, Bento JC. Nutrientes em cultivares de *Brachiaria brizantha* e estilosantes em cultivo solteiro e consorciado. *Arch Zootec.* 2013;62:513-23.
- Neill C, Coe MT, Riskin SH, Krusche AV, Elsenbeer H, Macedo MN, McHorney R, Lefebvre P, Davidson EA, Scheffler R, Figueira AMS, Porder S, Deegan LA. Watershed responses to Amazon soya bean cropland expansion and intensification. *Phil Trans R Soc B.* 2013;368:20120425.
- Novais RF, Smyth TJ, Nunes FN. Fósforo. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 276-374.
- Nunes RS, Sousa DMG, Goedert WJ, Vivaldi LJ. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. *Rev Bras Cienc Solo.* 2011;35:877-88.
- Oliveira Junior A, Castro C, Klepker D, Oliveira FA. Soja. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, editores. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: culturas. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2010. v. 3. p. 1-38.
- Pandolfo CM, Tedesco MJ. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. *Pesq Agropec Bras.* 1996;31:753-8.
- Pauletti V. Rendimento de soja, milho e feijão com estratégias de aplicação de adubo mineral, no sistema plantio direto [tese]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2006.
- Pauletti V, Motta ACV. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Estadual Paraná; 2017.
- Pauletti V, Pierri L, Ranzan T, Barth G, Motta ACV. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo.* 2014;38:495-505.
- Pereira FCBL, Mello LMM, Pariz CM, Mendonça VZ, Yano EH, Miranda EEV, Crusciol CAC. Autumn maize intercropped with tropical forages: crop residues, nutrient cycling, subsequent soybean and soil quality. *Rev Bras Cienc Solo.* 2016;40:e0150003.
- Primavesi AC, Primavesi O, Corrêa LA, Silva AG, Cantarella H. Nutrientes na fitomassa de capim-marandu em função de fontes e doses de nitrogênio. *Cienc Agrotec.* 2006;30:562-8.
- Prochnow LI. Avaliação e manejo da acidez do solo. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2014. p. 5-9. (Informações Agronômicas, 146).
- Ray DK, Mueller ND, West PC, Foley JA. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE.* 2013;8:e66428.
- Reddy PP. Sustainable intensification of crop production. Singapura: Springer Nature. 2016.
- Rein TA, Sousa DMG. Adubação com enxofre. In: Sousa DMG, Lobato E, editores. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados; 2004. p. 227-44.

Resende AV, Borghi E, Gontijo Neto MM, Santos FC, Coelho AM, Simão EP. Nutrição e adubação da cultura do milho. In: Prado RM, Campos CNS, editores. Nutrição e adubação de grandes culturas. Jaboticabal: FCAV; 2018. p. 253-74.

Resende AV, Coelho AM. Amostragem para mapeamento e manejo da fertilidade do solo na abordagem da agricultura de precisão. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2017. p. 1-8. (Informações Agronômicas, 159).

Resende AV, Coelho AMC, Santos FC, Lacerda JJJ. Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central. Sete Lagoas: Embrapa; 2012.

Resende AV, Fontoura SMV, Borghi E, Santos FC, Kappes C, Moreira SG, Oliveira Junior A, Borin ALDC. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2016a. p. 1-17. (Informações Agronômicas, 156).

Resende AV, Furtini Neto AE, Alves VMC, Muniz JA, Curi N, Faquin V, Kimpara DI, Santos JZL, Carneiro LF. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. Rev Bras Cienc Solo. 2006;30:453-66.

Resende AV, Gutiérrez AM, Silva CGM, Almeida GO, Guimarães PEO, Moreira SG, Gontijo Neto MM. Requerimentos nutricionais do milho para produção de silagem. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo; 2016c.

Resende AV, Hurtado SMC, Vilela MF, Corazza EJ, Shiratsuchi LS. Aplicações da agricultura de precisão em sistemas de produção de grãos no Brasil. In: Bernardi ACC, Naime JM, Resende AV, Bassoi LH, Inamasu RY, editores. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa; 2014. p. 194-208.

Resende AV, Silva CGM, Gutiérrez AM, Simão EP, Guimarães LJM, Moreira SG, Borghi E. Indicadores de demanda nutricional de macro e micronutrientes por híbridos modernos de milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo; 2016b.

Resende M, Curi N, Rezende SB, Corrêa GF. Pedologia: base para distinção de ambientes. 2. ed. Viçosa; MG: NEPUT; 1995.

Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez V VH. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: CFSEMG; 1999.

Riskin SH, Neill C, Jankowski K, Krusche AV, McHorney R, Elsenbeer H, Macedo MN, Nunes D, Porder S. Solute and sediment export from Amazon forest and soybean headwater streams. Ecol Appl. 2017;27:193-207.

Riskin SH, Porder S, Neill C, Figueira AMS, Tubbesing C, Mahowald N. The fate of phosphorus fertilizer in Amazon soya bean fields. Phil Trans R Soc B. 2013;368:20120154.

Ritchey KD, Cerkauskas RF, Silva JE, Vilela L. Residual effects of potassium and magnesium on soybean yield and disease incidence in a Cerrado Dark Red Latosol. Pesq Agropec Bras. 1987;22:825-32.

Rodrigues M, Pavinato PS, Withers PJA, Teles APB, Herrera WFB. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. Sci Total Environ. 2016;542:1050-61.

Rosolem CA, Biscaro T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. Pesq Agropec Bras. 2007;42:1473-8.

Rosolem CA, Vicentini JPTMM, Steiner F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. *Rev Bras Cienc Solo*. 2012;36:1507-15.

Rotz CA, Taube F, Russelle MP, Oenema J, Sanderson MA, Wachendorf M. Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Sci*. 2005;45:2139-59.

Roy ED, Richards PD, Martinelli LA, Coletta LD, Lins SEM, Vazquez FF, Willig E, Spera AS, VanWey LK, Porder S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. *Nat Plants*. 2016;2:2-7.

Roy ED, Willig E, Richards PD, Martinelli LA, Vazquez FF, Pegorini L, Spera AS, Porder S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. *Agr Ecosyst Environ*. 2017;249:206-14.

Sá JCM. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: Yamada T, Abdala SRS, editores. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: Potafos; 2004. p. 201-22.

Sá JCM, Cerri CC, Lal R, Dick WA, Piccolo MC, Feigl BE. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Till Res*. 2009;104:56-64.

Sá JCM, Seguy L, Sá MFM, Ferreira AO, Briedis C, Santos JB, Canalli L. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, editores. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Contexto mundial e práticas de suporte. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2010. v. 1. p. 383-420.

Sá JCM, Séguy L, Tivet F, Lal R, Bouzinac S, Borszowskei PR, Briedis C, Santos JB, Hartman DC, Bertoloni CG, Rosa J, Friedrich T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. *Land Degrad Dev*. 2015;26:531-43.

Sá MFM, Santos JB, Oliveira A. Dinâmica da matéria orgânica nos Campos Gerais. In: Santos GA, Silva LS, Canellas LP, Camargo FAO, editores. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole; 2008. p. 443-61.

Saath KCO, Fachinello AL. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. *Rev Econ Sociol Rural*. 2018;56:195-212.

Salton JC, Tomazi M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; 2014. (Comunicado técnico, 198).

Santos FC, Albuquerque Filho MR, Vilela L, Ferreira GB, Carvalho MCS, Viana JHM. Decomposição e liberação de macronutrientes da palhada de milho e braquiária, sob integração lavoura-pecuária no Cerrado Baiano. *Rev Bras Cienc Solo*. 2014;38:1855-61.

Santos FC, Neves JCL, Novais RF, Alvarez V VH, Sediyaama CS. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. *Rev Bras Cienc Solo*. 2008;32:1661-74.

Sattari SZ, Bouwman AF, Giller KE, van Ittersum MK. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *PNAS*. 2012;109:6348-53.

Silva AC, Freitas RS, Ferreira LR, Fontes PCR. Acúmulo de macro e micronutrientes por soja e *Brachiaria brizantha* emergida em diferentes épocas. *Planta Daninha*. 2009;27:49-56.

Silva AP, Babujia LC, Franchini JC, Ralisch R, Hungria M, Guimarães MF. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. *Soil Till Res.* 2014a;142:42-53.

Silva CGM, Resende AV, Gutiérrez AM, Moreira SG, Borghi E, Almeida GO. Macronutrient uptake and export in transgenic corn under two levels of fertilization. *Pesq Agropec Bras.* 2018;53:1363-72.

Silva EC, Ambrosano EJ, Scivittaro WB, Muraoka T, Buzetti S, Carvalho AM. Adubação verde como fonte de nutrientes às culturas. In: Lima Filho OF, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD, editores. *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática.* Brasília, DF: Embrapa; 2014b. v. 1. p. 265-305.

Silva EC, Muraoka T, Guimarães GL, Buzetti S. Acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura e no milho cultivado em sucessão sob diferentes doses de nitrogênio em plantio direto. *Rev Bras Milho Sorgo.* 2006;5:202-17.

Silva JE, Lemainski J, Resck DVS. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de Cerrados do oeste baiano. *Rev Bras Cienc Solo.* 1994;18:541-7.

Silva LS, Gatiboni LC, Anghinoni I, Sousa RO, editores. *Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.* Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2016.

Siqueira Neto M, Venzke Filho SP, Piccolo MC, Cerri CEP, Cerri CC. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I - sequestro de carbono no solo. *Rev Bras Cienc Solo.* 2009;33:1013-22.

Soratto RP, Fernandes AM, Santos LA, Job ALG. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: I - macronutrientes. *Rev Bras Cienc Solo.* 2013;37:1027-42.

Sousa DMG, Lobato E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: Yamada T, Abdala SRS, editores. *Fósforo na agricultura brasileira.* Piracicaba: Potafos; 2004b. p. 157-200.

Sousa DMG, Lobato E. *Cerrado: correção do solo e adubação.* 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados; 2004a.

Sousa DMG, Lobato E, Rein TA. *Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado.* Planaltina: Embrapa Cerrados; 2005.

Sousa DMG, Nunes RS, Rein TA, Santos Junior JDG. Manejo do fósforo na região do Cerrado. In: Flores RA, Cunha PP, editores. *Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado.* Goiânia: Gráfica UFG; 2016. p. 291-357.

Syers JK, Johnston AE, Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Roma: FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18; 2008 [cited 2019 Jan 15]. Available from: <http://www.fao.org/3/a-a1595e.pdf>.

Teixeira VI. *Ciclagem de nutrientes em pastagens de Brachiaria decumbens Stapf. sob diferentes lotações animais [tese].* Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco; 2010.

Tormena CA, Anghinoni G, Watanabe R, Ferreira CJB. Qualidade física do solo em sistemas intensivos de produção agrícola. In: Kappes C, editor. *Boletim de Pesquisa 2017/2018.* Rondonópolis: Fundação Mato Grosso; 2017. p. 108-24.

Ucker FE, De-Campos AB, Hernani LC, Macêdo JR, Melo AS. Movimentação vertical do íon potássio em Neossolos Quartzarênicos sob cultivo com cana-de-açúcar. *Pesq Agropec Bras.* 2016;51:1548-56.

Urquiaga S, Alves BJR, Jantalia CP, Martins MR, Boddey RM. Acultura do milho e seu impacto nas emissões de GEE no Brasil. In: Karam D, Magalhães PC, editores. *Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global*. Sete Lagoas: ABMS; 2014. p. 61-71.

van Raij B, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC, editores. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: IAC; 1996. (Boletim técnico, 100).

van Raij B. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo. São Paulo: ANDA; 1988.

van Wart J, Kersebaum KC, Peng S, Milner M, Cassman KG. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crop Res.* 2013;143:34-43.

Vezzani FM, Mielniczuk J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Rev Bras Cienc Solo.* 2009;33:743-55.

Werle R, Garcia RA, Rosolem CA. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *Rev Bras Cienc Solo.* 2008;32:2297-305.

Wilda LRM. Plant sensors for nitrogen monitoring and fertilization impacts on the nutrient dynamic on maize crop [tese]. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2018.

Withers PJA, Doody DG, Sylvester-Bradley R. Achieving sustainable phosphorus use in food systems through circularisation. *Sustainability.* 2018b;10:1804.

Withers PJA, Rodrigues M, Soltangheisi A, Carvalho TS, Guilherme LRG, Benites VM, Gatiboni LC, Sousa DMG, Nunes RS, Rosolem CA, Andreote FD, Oliveira Junior A, Coutinho ELM, Pavinato PS. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Sci Rep.* 2018a;8:2537.

Yagi R, Ferreira ME, Cruz MCP, Barbosa JC, Araújo LAN. Soil organic matter as a function of nitrogen fertilization in crop successions. *Sci Agric.* 2005;62:374-80.

Zancanaro L, Kappes C, Valendorff JDP, Coradini D, David MA, Ono FB, Semler TD, Vidotti MV. Manejo do solo, adubação e nutrição na cultura da soja. In: Kappes C, editor. *Boletim de Pesquisa 2017/2018*. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso; 2017. p. 54-79.

Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. *Sci Total Environ.* 2018;612:522-37.