



# Mega tendências

## da Ciência do Solo 2030

Livia Abreu Torres  
Silvia Kanadani Campos  
*Editoras Técnicas*

**Embrapa**

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Solos  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

# **Megatendências da Ciência do Solo 2030**

*Lívia Abreu Torres  
Sílvia Kanadani Campos*

*Editoras técnicas*

***Embrapa  
Brasília, DF  
2022***

## **Embrapa Solos**

Rua Jardim Botânico, 1024.

Jardim Botânico, Rio de Janeiro, RJ - CEP: 22460-000

Fone: + 55 (21) 2179-4500

[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)

[www.embrapa.br/fale-conosco/sac](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac)

## **Unidade responsável pelo conteúdo e edição**

Embrapa Solos

## **Comitê Local de Publicações**

Presidente: *Silvio Barge Bhering*

Secretário-Executivo: *Marcos Antônio Nakayama*

Membros: *Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pedreira, David Vilas Boas de Campos, Evaldo de Paiva Lima, José Francisco Lumbreras, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Lucia Raquel Queiroz Pereira da Luz, Maurício Rizzato Coelho, Wenceslau Geraldes Teixeira*

Supervisão editorial: *Marcos Antônio Nakayama*

Normalização bibliográfica: *Luciana Sampaio de Araujo (CRB-7/5165)*

Projeto gráfico da coleção: *Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica: *Alexandre Abrantes Cotta de Mello*

Capa: *Eduardo Guedes de Godoy*

## **1ª edição**

E-book (2022)

### **Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Solos

---

Megatendências da Ciência do Solo 2030 / Lívia Abreu Torres, Silvia Kanadani Campos, editoras técnicas. – Brasília, DF : Embrapa, 2022.

E-book : il. color.

E-book no formato ePub.

ISBN 978-65-87380-86-5

1. Solo. 2. Pedologia. 3. Agricultura Sustentável. 4. Meio Ambiente. 5.  
Tecnologia. I. Torres, Livia Abreu. II. Campos, Silvia Kanadani. III. Embrapa Solos.  
CDD 631.4

---

Luciana Sampaio de Araujo (CRB-7/5165)

© Embrapa, 2022

## Capítulo 5. Intensificação da agricultura com sustentabilidade

*Rosângela Stralio, Rachel Bardy Prado, Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz, Margareth Gonçalves Simões, Ademir Fontana, José Eloir Denardin, Vanderlise Giongo, André Júlio do Amaral, Silmara Rossana Bianchi e Gizelle Cristina Bedendo*

O crescimento populacional do mundo projeta um aumento da demanda por alimentos e produtos agrícolas que ocasionará pressões antrópicas ainda maiores sobre os recursos naturais solo, água e atmosfera. Para superar esse desafio, é inevitável a intensificação da agricultura em termos de produtividade, rentabilidade, competitividade, reduzindo a pressão predatória sobre os recursos naturais e, a expansão da fronteira agrícola. Será necessário aumentar a produtividade não apenas por unidade de área, mas por unidade de insumos que deverão ser precisa e eficientemente aplicados.

Nas últimas cinco décadas, a transformação de grandes extensões de terras consideradas inadequadas à produção agrícola mediante uso de corretivos e fertilizantes; o melhoramento genético das culturas, que permitiu o cultivo de duas ou mais safras por ano agrícola e o desenvolvimento de cultivares resistentes à pragas; o investimento na mecanização agrícola, e a adoção de práticas agrícolas conservacionistas como o sistema de plantio direto (SPD), modificaram profundamente o cenário agrícola nacional.

A agricultura brasileira vem demonstrando robustez, eficiência e competitividade. Entre 1971 e 2016, a produtividade total dos fatores (PTF)<sup>1</sup> da agricultura brasileira cresceu 2,8%, atrás apenas

da China<sup>2</sup>, com 3,6% (Estados Unidos, 2020), e está estimada em 2,9% para o decênio de 2021 a 2030 (Brasil, 2020a). O desempenho singular desses fatores, nas regiões de clima tropical e subtropical do Brasil, foi e vem sendo atingido com base na aplicação do conhecimento técnico-científico e no desenvolvimento de tecnologias que propiciaram não apenas saltos de produtividade, mas também de qualidade dos produtos produzidos. Desta forma, os produtos da agricultura brasileira, além de abastecer o mercado interno, estão também sendo exportados, somando US\$ 100,81 bilhões em 2020 (Brasil, 2021b), contribuindo com a segurança alimentar e promovendo o equilíbrio da balança comercial do País.

Apesar dos avanços, as estimativas da produtividade total dos fatores alertam que a produção agrícola não está crescendo rápido o suficiente para atender, com sustentabilidade à crescente demanda global por alimentos, fibras e bioenergia (Crouzeilles et al., 2019). A conquista da intensificação de sistemas de produção, com caráter de sustentabilidade, requer mais investimentos e incentivos em pesquisa e inovações nos processos agropecuários. O uso eficiente e a redução da degradação do solo, da poluição da água e da emissão de gases de efeito estufa na agricultura, a reinserção de terras degradadas aos sistemas de produção agropecuários, o desenvolvimento de metodologias de análise de solo e tecido vegetal baseados nos princípios da química verde, a inovação no desenvolvimento de novas fontes de fertilizantes e insumos agrícolas, tendentes aos bioinsumos, e tecnologias e processos agropecuários para promoção do melhor aproveitamento de nutrientes pelas plantas são temas estratégicos para avanços neste campo que serão discutidos a seguir.

O Brasil tem hoje um dos maiores planos de agricultura sustentável do mundo (Brasil, 2021a). O Plano de Agricultura de

Baixo Carbono (+ABC) considera cinco tecnologias com maior potencial de mitigação de gases de efeito estufa na agricultura brasileira: as contribuições da AC; o aumento da extensão de florestas plantadas; a recuperação de pastagens; a intensificação dos sistemas integrados de produção (iLPF – integração Lavoura-Pecuária-Floresta) e a fixação biológica de nitrogênio (FBN). A Rede iLPF estima a implantação dos sistemas em 35 milhões de hectares até 2030 (Rodrigues et al., 2021). Há quatro possibilidades de adoção desses sistemas integrados: iLP (integração Lavoura-Pecuária); iPF (integração Pecuária-Floresta); iLF (integração Lavoura-Floresta) e iLPF, sendo este último adotado por 83% dos agricultores (Rede ILPF, 2021).

## Pressões e degradação do solo e da água no Brasil

A escassez hídrica mundial tem sido motivo de preocupação e discussão nos diferentes níveis da sociedade. A Organização das Nações Unidas estima que a demanda de água mundial vai aumentar em 50% até 2030. Embora possua grandes reservas de água doce, incluindo parte majoritária do Aquífero Guarani (70%), o Brasil está sujeito à distribuição da água de forma não homogênea tanto no espaço (região Norte 68,5%, região Centro-Oeste 15,7%, região Sul 6,5%, região Sudeste 6,0% e região Nordeste 3,3%) quanto no tempo (algumas regiões têm seu regime de chuvas concentrado em poucos meses, seguidos de longo período de estiagem e rios intermitentes como é o caso do Semiárido do Nordeste). A distribuição de renda, a gestão hídrica, o montante de investimentos em infraestrutura e recursos humanos e outros aspectos socioeconômicos podem também influenciar a disponibilidade dos recursos hídricos. Estas diferenças naturais e sociais têm sido responsáveis pela situação de escassez hídrica no país (Prado et al., 2017).

O uso da água no meio rural representa 83% da demanda total brasileira, sendo 72% destinados para irrigação. A área irrigável no Brasil é de aproximadamente 29,6 milhões de hectares e o desperdício de água, estimado em 50% (perdas em sistemas inadequados ou vazamentos nas tubulações) é preocupante. A disponibilidade hídrica desses mananciais recebe os efeitos, positivos e negativos, afetando a oferta de água. Em termos de qualidade, apesar da poluição urbana ser a principal fonte de degradação, a poluição difusa de origem rural (elevada utilização de fertilizantes, pesticidas e perda de solos pelos processos erosivos) pode exercer impacto negativo em regiões com extensas áreas agropecuárias.

Também, as perdas anuais de solos no Brasil são da ordem de 500 milhões de toneladas pela erosão, ocasionando a perda média da capacidade de armazenamento dos reservatórios de 0,5% ao ano, considerada bastante elevada. Muitos rios chegam ao mar com uma vazão muito reduzida, em função do assoreamento, como é o caso do rio Paraíba do Sul e do rio São Francisco, essenciais para o abastecimento de água de grande parte da população brasileira (Prado et al., 2017). Adiciona-se a este cenário um passivo ambiental de 21 a 30 milhões de hectares a serem restaurados no Brasil, grande parte de pastagens degradadas (Sparovek et al., 2010). Como consequência da contaminação e degradação dos solos e da água superficial e subterrânea, ocorrem prejuízos incalculáveis à biodiversidade terrestre e aquática, à saúde humana e à economia do país. Quantificar o grau de impacto e degradação do solo e da água pelas ações antrópicas no meio rural e propor soluções práticas, eficientes e de baixo custo, consiste em um dos maiores desafios da pesquisa agropecuária brasileira.

## Uso eficiente do solo e da água na agricultura

De acordo com o relatório da FAO (2015) sobre o status do Recurso Solo no Mundo, foram identificadas 10 ameaças ou processos de ordem física, química ou biológica que dificultam o Manejo Sustentável dos Solos em áreas agrícolas listados a seguir: erosão hídrica e eólica; perda de carbono orgânico; desequilíbrio de nutrientes; salinização; contaminação; acidificação, perda da biodiversidade; selamento superficial, compactação e inundação. Essas ameaças variam em termos de intensidade e tendência dependendo do contexto geográfico local (FAO, 2017), todos estes processos precisam ser considerados para alcançar o uso eficiente dos Solos na agricultura. O fenômeno da erosão hídrica destaca-se pela sua extensão e abrangência considerado um processo irreversível que pode evoluir e tornar as áreas desertificadas a exemplo do que já ocorre em alguns núcleos de desertificação na região Nordeste. Controlar os processos erosivos em áreas agrícolas torna-se o principal desafio para o manejo sustentável dos solos agrícolas (FAO, 2019).

Diante do histórico de degradação da água no meio rural, é premente que medidas sejam tomadas tanto pelos produtores rurais, em nível de propriedade, bem como pelos tomadores de decisão no nível da paisagem, de modo a assegurar a provisão de água para os usos múltiplos. Na propriedade, é importante que se faça a adequação ambiental conforme prevê o Código Florestal, devido ao papel essencial do componente arbóreo para a provisão de água. Também há diversas práticas conservacionistas capazes de melhorar a qualidade do solo, a infiltração e o fluxo de base que alimenta os mananciais superficiais de água no período de estiagem, a retenção de água na bacia hidrográfica, evitando-se ainda os processos erosivos. São eles: micro barragens, terraceamento, curvas de nível, além dos sistemas de cultivo conservacionistas.

Serão necessários esforços colaborativos e alianças estratégicas para promover o avanço da agricultura conservacionista (AC), com destaque para sistemas de produção que promovam o aporte contínuo de matéria orgânica ao solo a ciclagem de nutrientes e a regulação hídrica proporcionando maiores taxas de infiltração de água no solo (redução do escoamento superficial), bem como o uso de bioinsumos e a adubação verde. A promoção da adoção dessas tecnologias e sistemas de produção trará vantagens competitivas ao produtor brasileiro que poderá explorar novos nichos de mercado com oportunidades tanto para pequenos e médios quanto para grandes produtores rurais desde que os produtos atendam as legislações vigentes e, principalmente atendam às expectativas do consumidor que tende a ser cada vez mais exigente quanto aos critérios de sustentabilidade. Portanto, espera-se que no futuro a gestão do solo nas propriedades rurais seja otimizada, considerando que o solo é o substrato responsável por 95% da produção de alimentos que chega à mesa da população. No entanto, estabelecer métricas e mecanismos para avaliar e promover o uso e manejo eficiente do solo na agricultura com a promoção de serviços ecossistêmicos considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais será de fundamental importância para o fortalecer ainda mais o setor agropecuário e florestal brasileiro. Desenhar, monitorar, valorar e demonstrar o manejo e a eficiência de sistemas agropecuários integrados e conservacionistas é papel dos pesquisadores da ciência do solo e sua ambiência.

A irrigação também precisa ser mais eficiente, fazendo-se uso dos métodos recomendados para cada tipo de solo e cultura, além do seu manejo a partir do monitoramento preciso da evapotranspiração, utilização de sistemas mais eficientes e adaptados às condições locais, evitando desperdício de água e energia, onde a pesquisa pode muito apoiar gerando tecnologias e

métodos acessíveis aos diferentes tipos de produtores rurais. Em regiões cuja disponibilidade hídrica é muito variável, reservatórios de pequeno porte, barragens subterrâneas (Silva et al., 2007) e captação de água da chuva em propriedades agrícolas podem melhorar a disponibilidade hídrica, para atender aos usos múltiplos, reduzindo a vulnerabilidade em relação à variabilidade hidrológica (Prado et al., 2017). Também é importante promover o reuso da água na propriedade rural. Palhares et al. (2019) apresentam experiências de consumo de água na pecuária e, discutem o manejo de resíduos animais e sua utilização como fertilizante, bem como tecnologias disponíveis para reuso e tratamento da água.

Para conter as fontes de poluição pontuais da água no meio rural é preciso ainda um empenho, tanto do produtor para a construção de fossas sépticas, como dos gestores locais para investirem no tratamento dos efluentes domésticos e da agroindústria no meio rural (a pesquisa poderá contribuir com o monitoramento de baixo custo da qualidade da água). A Embrapa desenvolveu uma tecnologia de baixo custo, denominada Fossa Séptica Biodigestora, que pode ser facilmente adotada no meio rural (Otenio et al., 2014).

Em relação às fontes difusas de poluição da água, em especial fertilizantes e pesticidas, é preciso avançar com a otimização da aplicação desses insumos e a pesquisa pode apoiar com ferramentas para avaliar e mapear de forma expedita a fertilidade dos solos bem como no controle integrado e biológico de pragas por meio do avanço das pesquisas em bioinsumos. A contenção dos processos erosivos contribuirá para a redução do assoreamento dos corpos hídricos e dos custos elevados do tratamento da água para o abastecimento, nesse aspecto a pesquisa poderá contribuir com o monitoramento e modelagem hidrológico e a valoração econômica. Ao pensar a paisagem rural, destaca-se a necessidade do planejamento no nível de bacias

hidrográficas, com a elaboração e implantação de políticas de incentivo à proteção e restauração de matas ciliares e nascentes, adequação de estradas, bem como para nortear a destinação correta de resíduos sólidos e líquidos (Prado et al., 2017). A pesquisa tem potencial para apoiar, com ferramentas e métodos, as políticas, programas e projetos com foco na conservação da água no meio rural, como é o caso dos Pagamentos por Serviços Ambientais (Fidalgo et al., 2017).

## Agricultura Conservacionista

A aprovação do Código Florestal Brasileiro foi um marco na legislação ambiental brasileira e o setor agropecuário tem preservado muito mais que o exigido por lei. Dados recentes mostram que, de 1970 até 2018, o chamado efeito “poupa-terra”, que reflete a área preservada em função do aumento da produtividade da agricultura brasileira, permitiu reduzir, expressivamente, o avanço da agricultura sobre uma área de 775 milhões de hectares (Vieira Filho, 2019). Esse efeito “poupa-terra”, que envolve tecnologia para elevação da produtividade, rentabilidade, competitividade e preservação ambiental foi responsável pela preservação de áreas de campo e floresta em cerca de 26% na Região Sul, 29% no Sudeste e 49% no Centro-Oeste (Vieira Filho, 2019).

Dentre os principais avanços proporcionados pelo investimento em pesquisa pública e desenvolvimento pode-se citar: o melhoramento genético das culturas, responsável pela possibilidade do cultivo de duas ou mais safras anuais de grãos e o lançamento de cultivares resistentes às principais pragas, e a adoção em larga escala do Sistema de Plantio Direto (SPD), que constitui um dos pilares da agricultura conservacionista (AC) (Gasques, 2017). Pode-se ainda elencar o avanço no

conhecimento dos solos tropicais e a consequente adequação de práticas e de sistemas de produção à capacidade de uso e aptidão agrícola das terras (Derpsch et al., 2010). Associa-se às práticas consideradas chave para o sucesso produtivo agrícola, como o manejo das Plantas – raízes e cobertura; do Solo - calagem, fertilização e agregação e da Água – infiltração e retenção.

A intensificação da agricultura com sustentabilidade é uma condição a ser atingida, mediante adoção de sistemas de produção compostos por cultivos que busquem manter o solo permanentemente coberto com plantas vivas, superando a visão tradicional de safras com limites temporais. É mediante a adoção do SPD, dotado do rigor dos preceitos que verdadeiramente o elegem como ativo tecnológico de cunho conservacionista, que os cultivos, envolvendo diversificação de espécies, estruturada em sistemas integrados, permite a utilização integral dos recursos disponíveis na terra. Associam-se às práticas consideradas chave para o sucesso da intensificação da agricultura: manejo de plantas aporte de biomassa ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatível com a demanda biológica do solo; manejo do solo - correção dos indicadores químicos da fertilidade do solo e estabilização estrutural do solo; manejo da água – infiltração e retenção de água no solo; e manejo dos fluxos de gases do solo – interceptação dos ciclos biogeoquímicos do carbono e do nitrogênio (Denardin et al., 2012).

São inúmeros os desafios a serem superados e as estratégias ofertadas para a consolidação da AC, nas diferentes regiões do País, visando imprimir caráter de sustentabilidade nos sistemas agrícolas brasileiros. Dentre esses, incluem-se apoio por políticas públicas, envolvendo capacitação tecnológica, transferência de tecnologia e programas de crédito ou incentivos diversos.

O futuro da intensificação passa da super produção e de

intensidade por área para o atingimento do máximo potencial das terras (solo, espécies, agricultor – acesso à tecnologia e ao conhecimento, infraestrutura disponível), racionalização dos insumos – ciclagem e reciclagem de nutrientes, conservação do solo e da água e biodiversidade. Por fim, a intensificação é uma condição dependente dos fatores de produção, por meio do planejamento e monitoramento dos sistemas produtivos, pelo manejo e práticas conservacionistas e da gestão de riscos econômicos dos fenômenos naturais adversos.

Investimentos devem ser feitos em melhoria da infraestrutura e logística, na promoção de novos mercados externos e na elaboração de políticas agrícolas (crédito, seguro, armazenagem, garantia de renda, economia de baixo carbono, fomento à produção de biocombustíveis, sucessão empresarial das fazendas familiares, irrigação, educação, crédito e assistência técnica e extensão rural etc.) mais eficientes, que atendam os produtores rurais.

## Reinserção de terras degradadas aos sistemas de produção agropecuários

De acordo com estimativas da FAO (2015), cerca de 33% das áreas de produção agropecuária existentes no mundo atualmente encontram-se com algum grau de degradação. Diversas são as causas da degradação dos solos agricultáveis ao redor do mundo, constituindo-se assim, em maior ou menor grau, um problema para todos os países produtores. Tais causas se relacionam à combinação de fatores naturais, como à suscetibilidade dos solos à degradação, com atividades antrópicas relacionadas aos tipos de uso e manejo do solo. Dentre os fenômenos que mais conduzem à degradação dos solos, destaca-se a erosão hídrica como um dos processos mais atuantes, sobretudo nas regiões tropicais cujo regime de precipitação apresenta, normalmente, altos níveis de

erosividade (Lal, 2001, 2017; Guerra; Jorge, 2014; García-Ruiz et al., 2017). Os processos erosivos causam a degradação física, química e biológica dos solos condicionando a perda da fertilidade natural e da capacidade produtiva dos solos. Como destacam Lal e Stewart (1990), a degradação dos solos agricultáveis por erosão põe em risco a segurança alimentar, constituindo ainda um dos maiores desafios a ser enfrentado pela humanidade.

Estima-se que o Brasil possui cerca de 180 milhões de hectares de pastagens sendo que pelo menos 50% dessas áreas encontram-se em algum estágio de degradação, que poderão ser alvo da implementação de sistemas integrados que preconizam um conjunto de tecnologias alinhadas com os princípios da AC, tendo o SPD como sistema basilar, envolvendo a produção agrícola, pecuária e florestal na mesma área, em sistemas de consorciação, rotação ou sucessão de culturas (Rodrigues et al., 2021).

A adoção desses sistemas implica na superação de barreiras econômicas, tecnológicas e ambientais, envolvendo capacitação técnica implementação de sistemas produtivos, econômica e ambientalmente viáveis, para os diferentes estratos fundiários das diferentes regiões agroecológicas do País (Rodrigues et al., 2021).

Deste modo, a manutenção ou recuperação da capacidade produtiva dos solos emergem como um imperativo, colocando a questão no centro da discussão sobre a sustentabilidade da agricultura mundial. A questão envolvendo a degradação dos solos agrícolas tem ganhado relevância nas agendas políticas e científicas em diversos fóruns ao redor do mundo. Neste contexto, a Organização da Nações Unidas (ONU) proferiu, no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o objetivo de número 15: “Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e

deter a perda de biodiversidade”; que explicitamente faz menção à problemática em tela. A mesma Agência, por meio da FAO, lançou as Diretrizes Voluntárias para as Políticas Agroambientais (FAO/ONU) que, dentre vários objetivos, destaca a questão da degradação dos solos. Entidades científicas como o Global Soil Partnership (GSP) recorrentemente têm destacado a questão da necessidade de conservação dos solos. Políticas públicas, no âmbito nacional, também têm expressado preocupação com a degradação dos solos, como o Programa ABC (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento- MAPA); o Programa Águas do Agro (MAPA) e os Programas Estaduais de Microbacias.

Atualmente no Brasil, encontram-se vastas áreas abandonadas, subutilizadas com pastagens degradadas ou com culturas agrícolas de baixo rendimento, sem o devido e efetivo controle da erosão, gerando, em média, a perda anual de 15 a 20 toneladas de solos férteis por hectare (Hernani et al., 2002). A depleção da capacidade produtiva dos solos na maioria das regiões de produção agropecuária do país decorre de fatores naturais e antrópicos, notadamente, a susceptibilidade natural dos solos à erosão em associação ao manejo inadequado e/ou à adoção de sistemas de produção sem considerar a aptidão agrícola das terras. Pondo em risco a sustentabilidade do setor agropecuário, a degradação dos solos gera impactos socioeconômicos diretos nas populações rurais que dependem das cadeias de produção e impactos em diversos serviços ecossistêmicos, notadamente no ciclo do carbono, dos nutrientes e da água.

Sendo assim, se faz necessário investir na prevenção, mitigação e na reversão da situação de degradação geral dos solos agricultáveis em todo o Brasil. O desafio consiste na reinserção de extensas áreas ocupadas em maioria com pastagens degradadas à cadeia de produção agropecuária, por meio da introdução de

sistemas de produção tecnicamente avaliados, sustentáveis e adequados a cada realidade socioambiental. Desafio este que exige a articulação de ações em diferentes planos de atuação no âmbito da pesquisa agrônômica, capacitação técnica, transferência de tecnologia e implementação de políticas públicas de fomento e financiamento.

Neste contexto, os programas de pesquisa, desenvolvimento, inovação (PD&I) e transferência de tecnologia (TT), assumem relevante importância no tocante à operacionalização dessas políticas. Em termos de PD&I, pode-se individualizar duas frentes básicas de atuação. A primeira diz respeito à caracterização e avaliação diagnóstica dos processos e níveis de degradação, considerando a heterogeneidade ambiental de cada região determinada pelas características topográficas, climáticas e, sobretudo, pela diversidade taxonômica dos solos. A segunda se concentra na disponibilização de soluções técnicas para os problemas diagnosticados. Desta forma, no plano agrônômico, os desafios e as oportunidades residem notadamente no desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção agropecuária integrados e adaptados às realidades regionais, considerando as características das cadeias produtivas e o perfil dos produtores de cada região.

Neste sentido, o desenvolvimento de pesquisa interdisciplinar e colaborativa, com o envolvimento dos atores locais, baseada na avaliação do problema e nas soluções recomendadas pode gerar resultados mais assertivos. Além da adaptação dos sistemas de produção a cada situação regional, há a necessidade de fomentar a pesquisa para o desenvolvimento de insumos em suporte às iniciativas de recuperação e reinserção de áreas degradadas as cadeias produtivas. A introdução de insumos de menor custo, como bioinsumos (economia biológica) produzidos a partir de fontes

disponíveis localmente, assim como, o melhoramento genético de variedades, considerando à adaptação em áreas degradadas, podem configurar estratégias interessantes de pesquisa visando o barateamento da recuperação das áreas degradadas.

Em relação ao desenvolvimento de metodologias para a avaliação diagnóstica dos níveis de degradação e monitoramento de áreas degradadas, deve-se ponderar que devido a heterogeneidade das áreas em degradação, a detecção e caracterização remota dos solos/pastagens degradados ainda se configura um desafio, prescindindo de esforços de pesquisa e desenvolvimento metodológico. Metodologias estas que podem ser aplicadas às múltiplas escalas espaciais, do local ao regional.

A reinserção das áreas com solos degradados, mas ainda com potencial produtivo, às cadeias de produção é essencialmente uma questão de planejamento estratégico de interesse multisetorial que deve envolver agentes de governo, da pesquisa e tecnologia e do setor produtivo. A reinserção de vastas áreas, antes abandonadas ou subutilizadas, trará, certamente, vantagens excepcionais ao país na medida em que se aumenta a área de produção recuperando os passivos socioeconômicos e ambientais historicamente legados. Além disso contribui com as questões ambientais, diminuindo as emissões de GEE e a pressão sobre os remanescentes de vegetação nativa legalmente passíveis de serem incorporados às áreas de produção agropecuária,

Contudo, no plano político-institucional, diversos desafios se interpõem às políticas e programas de estado orientados à promoção da conservação e recuperação de solos agrícolas com vistas à reinserção de áreas degradadas à cadeia produtiva, entre eles: carência de programas abrangentes para a recuperação e conservação dos solos; descontinuidade das políticas públicas; ausência de garantias financeiro-orçamentárias; falta e/ou

adequação de linhas de crédito financeiro aos produtores;  
necessidade de extensão rural e assistência técnica especializada;  
necessidade de coordenação política entre os entes federativos.

Desta forma, é preciso fomentar o planejamento agroambiental, as práticas conservacionistas a partir da articulação e da implementação de políticas de manejo sustentável do solo, promovendo maior integração entre os setores e instituições de governança, pesquisa e transferência de tecnologia potencializando os investimentos conjuntos dos setores públicos e privados. Neste contexto se somam políticas que possam fomentar a capacitação de técnicos, formação de recursos humano, transferência de tecnologia, o estabelecimento de arranjos sociais que promovam a conservação e recuperação do solo, a autogestão ou gestão participativa e a certificação das propriedades rurais que adotem as práticas conservacionistas. No campo tecnológico destaca-se a necessidade de se promover a conectividade rural e a disponibilização de ferramentas de apoio a decisão e no financeiro a abertura de linhas de crédito voltado para conservação e/ou recuperação da capacidade produtiva dos solos.

## Química verde

Com o aumento das atividades industriais, desde a década de 40, a preocupação com o meio ambiente tem aumentado (De Marco et al., 2019) e desde então as empresas têm buscado adotar procedimentos e processos mais sustentáveis.

Dentro da área da Química não foi diferente, e na década de 90 Anastas e Warner apresentaram os 12 Princípios da Química Verde, que em resumo consiste na

busca, desenvolvimento e aplicação de produtos e métodos que possam ser menos agressivos ao homem e ao meio ambiente, visando a redução ou não utilização de solventes tóxicos, e conseqüentemente a não geração de resíduos provenientes de processos químicos (Anastas, 1999; De Marco et al., 2019).

A fim de responder às demandas da química verde, a química analítica vem direcionando esforços para miniaturização de técnicas que por consequência geram menos resíduos e, também, novas técnicas de análise que aliadas a equipamentos sofisticados e tecnologias podem, inclusive, ser totalmente livres de resíduos químicos, como a análise direta sem manipulação das amostras. Outra tendência que vem acompanhando e auxiliando nesse cenário é a automatização das análises, contribuindo para o uso mais racional e em menor escala dos reagentes em comparação com os procedimentos tradicionais.

A matriz solo se apresenta como um desafio nesse contexto. Contudo soluções baseadas em espectroscopia de infravermelho próximo e fotônica auxiliadas por big data e inteligência artificial têm surgido como ferramentas que permitem a análise de parâmetros como matéria orgânica, física do solo (areia e silte), textura do solo, pH e chegando até a presença de folhas, fertilizantes minerais e orgânicos e contaminantes de acordo com fornecedores da solução baseada em fotônica. Além dos preceitos de ausência de solventes, essas novas soluções trazem benefícios quanto a rapidez, custo e automação das análises.

Os métodos que envolvem espectrometria de

fluorescência de raios (XRF), também contribuem nesse cenário e, podem ser considerados uma ferramenta analítica quantitativa e qualitativa, que oferecem análises rápidas e não destrutivas usando procedimentos limpos que podem ser aplicados rotineiramente a amostras sólidas, como solos, plantas e fertilizantes (Bendicho et al., 2012).

Ainda que seja observado o surgimento dessas novas tecnologias, algumas determinações importantes permanecem sendo realizadas com o uso de reagentes. Desta forma, com permanência da necessidade e a preocupação crescente sobre o impacto de solventes tóxicos ao ambiente, novos solventes sustentáveis têm sido desenvolvidos, dentre eles os solventes eutéticos profundos naturais, os NADES (do inglês, Natural Deep Eutectic Solvents), que são formados por metabólitos primários e/ou compostos celulares como aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares ou derivados de colina. Esses compostos apresentam biodegradabilidade, baixa toxicidade, são estáveis, de baixo custo e preparo simples. Esses solventes têm sido utilizados na extração de analitos inorgânicos (macro, micronutrientes e contaminantes inorgânicos), em amostras de interesse agrônômico (Santana et al., 2020).

Por fim, notadamente a preocupação intrínseca que a comunidade científica apresenta quanto a sustentabilidade do solo é estendida para que as análises dessa matriz, e outras relacionadas, para que sejam realizadas com menor impacto possível. Nesse sentido, as novas tecnologias que permitem análises com uso mínimo ou nenhum de reagentes químicos têm

despontado como tendências assim como análises relacionadas, a exemplo da bioanálise de indicadores enzimáticos, que surgem como uma importante ferramenta complementar para avaliação da saúde do solo e contemplando os princípios da química verde.

## Referências

ANASTAS, P. T. Green chemistry and the role of analytical methodology development. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 3, p. 167-175, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408349891199356>.

BENDICHO, C.; LAVILLA, I.; PENA-PEREIRA, F.; ROMERO, V. Green chemistry in analytical atomic spectrometry: a review. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 27, n. 11, p. 1831-1857, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2JA30214D>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil deve ser destaque mundial no uso de bioinsumos nos próximos anos**. Brasília, DF: Mapa, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-deve-ser-destaque-mundial-no-uso-de-bioinsumos-nos-proximos-anos>. Acesso em: 13 jul. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Exportações do agro ultrapassam US\$ 100 bilhões pela segunda vez na história**. Brasília, DF: Mapa, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/exportacoes-do-agro-ultrapassam-a-barreira-dos-us-100-bilhoes-pela-segunda-vez>. Acesso em: 14 jul. 2021.

CROUZEILLES, R.; RODRIGUES, R. R.; STRASSBURG, B. B. N. (ed.). **Relatório temático sobre restauração de paisagens e ecossistemas**. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2019. Disponível em: [https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2019/10/Relatorio\\_Restauracao\\_VF.pdf](https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2019/10/Relatorio_Restauracao_VF.pdf). Acesso em: 31 jan. 2022.

DE MARCO, B. A.; RECHELO, B. S.; TÓTOLI, E. G.; KOGAWA, A. C.; SALGADO, H. R. N. Evolution of green chemistry and its multidimensional

impacts: A review. **Saudi Pharmaceutical Journal**, v. 27, n. 1, p. 1-8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.07.011>.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. A.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 15 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 141). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/91357/1/2012-documentosonline-141.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

FAO. **Manual de agricultura climaticamente inteligente**: resumen de orientación. Rome, 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/climatechange/37495-0edc2355c27f19ee5cee068a90496add9.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

FAO. **Soil erosion**: the greatest challenge to sustainable soil management. Rome, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>.

FAO. **Voluntary guidelines for sustainable soil management**. Rome, 2017. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6874en/i6874EN.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; SCHULER, A. E. (ed.). **Manual para pagamento por serviços ambientais hídricos**: seleção de áreas e monitoramento. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 78 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/160960/1/Manual-PSA-hidricos-2017.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; LANA-RENAULT, N.; NADAL-ROMERO, E.; CERDÀ, A. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 1, p. 5-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2641>.

GASQUES, J. G. Sources of growth in Brazilian agriculture: total factor productivity. **EuroChoices**, v. 16, n. 1, p. 24-25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12146>.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do C. O. (org.). **Degradação dos solos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, v. 12, n. 6, p. 519-539, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.472>.

LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: LAL, R. (ed.). **Soil erosion research methods**. Boca Raton: Routledge, 2017. cap. 1. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203739358>.

OTENIO, M. H.; SOUZA, F. de F. C. de; LIGÓRIO, P. P. L.; FAZZA, E.; SOARES, G.; BERNARDO, W. F.; MAGALHAES, V. M. A. de. **Como montar e usar a fossa séptica modelo Embrapa**: cartilhas adaptadas ao letramento do produtor. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 41 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/116734/1/Cnpgl-2014-Cartilha-Fossa-Septica-completa.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

PRADO, R. B.; FORMIGA-JOHNSON, R. M.; MARQUES, G. Uso e gestão da água: desafios para a sustentabilidade no meio rural. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 43-48, maio/ago. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167338/1/2017-043.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

REDE ILPF. **ILPF em números**. 2021. Disponível em: <https://www.redeilpf.org.br/index.php/rede-ilpf/ilpf-em-numeros>. Acesso em: 13 mar. 2021.

RODRIGUES, R. de A. R.; FERREIRA, I. G. M.; CORDEIRO, F. R. Carbon market potential in crop-livestock-forest integration systems. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FORESTRY SYSTEMS, 2., 2021. **WCCLF 2021 proceedings**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 933-937. WCCLF 2021. Evento online. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/230916/1/Carbon-market-potential-in-crop-livestock-forest-integration-systems-2021.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2022.

SANTANA, A. P. R.; ANDRADE, D. F.; GUIMARÃES, T. G. S.; AMARAL, C. D. B.; OLIVEIRA, A.; GONZALEZ, M. H. Synthesis of natural deep eutectic solvents using a mixture design for extraction of animal and plant samples prior to ICP-MS analysis. **Talanta**, v. 216, 120956, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120956>.

SILVA, M. S. L. da; MENDONÇA, C. E. S.; ANJOS, J. B. dos; FERREIRA, G. B.; SANTOS, J. C. P. dos; OLIVEIRA NETO, M. B. de. **Barragem subterrânea**: uma opção de sustentabilidade para a agricultura familiar do semi-árido do Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 10 p. (Embrapa Solos. Circular técnica, 36). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS-2010/13083/1/circtec36-2007barragem.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

SPAROVEK, G.; BERNDES, G.; KLUG, I. L. F.; BARRETTO, A. G. O. P. Brazilian agriculture and environmental legislation: status and future challenges. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 16, p. 6046-6053, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es1007824>.

VIEIRA FILHO, J. E. R. Sustentabilidade produtiva do agronegócio brasileiro. In: VIEIRA FILHO, J. E. R. (org). **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: Ipea, 2019. p. 11-27. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/191126\\_dia](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/191126_dia) Acesso em: 31 jan. 2022.

## Notas

<sup>1</sup> A PTF pode ser interpretada como o aumento da produção agrícola que não é explicada pelo aumento da quantidade dos insumos, mas sim pelos ganhos de produtividade destes, ou seja, a PTF mede a relação entre o produto total e o insumo total utilizado.

<sup>2</sup> Quando se consideram os principais países produtores agrícolas.