

## Uso e manejo do solo em sistemas de produção agropecuários nas regiões oeste e noroeste do Paraná<sup>(1)</sup>

Julio Cezar Franchini<sup>(2,10)</sup>, Alvadi Antonio Balbinot Junior<sup>(2)</sup>, Roberta Carnevalli<sup>(2)</sup>, Henrique Debiasi<sup>(2)</sup>; Graziela Moraes de Cesare Barbosa<sup>(3)</sup>, José Francirlei Oliveira<sup>(3)</sup>, Esmael Lopes dos Santos<sup>(4)</sup>, Anderson Antônio da Conceição Sartori<sup>(5)</sup>, Emerson da Silva Nunes<sup>(6)</sup>, Rafael Herrig Furlanetto<sup>(6)</sup>, Rodrigo Berger da Silva<sup>(7)</sup>, Vanei Tonini<sup>(8)</sup> e Hudson Carlos Lissoni Leonardo<sup>(9)</sup>

<sup>(1)</sup> Trabalho realizado com apoio financeiro da Embrapa, Governo do Estado do Paraná e Itaipu Binacional. <sup>(2)</sup> Pesquisadores, Embrapa Soja, Londrina, PR. <sup>(3)</sup> Pesquisadores, IDR-Paraná, Londrina, PR. <sup>(4)</sup> Técnico, Embrapa Soja, Londrina, PR. <sup>(5)</sup> Bolsista, Embrapa Soja, Londrina, PR. <sup>(6)</sup> Técnicos, Cocamar, Maringá, PR. <sup>(7)</sup> Técnico, Coopavel, Cascavel, PR. <sup>(8)</sup> Técnico, Copacol, Cafelândia, PR. <sup>(9)</sup> Técnico, Itaipu, Foz do Iguaçu, PR. <sup>(10)</sup> julio.franchini@embrapa.br

### Introdução

A produtividade e a rentabilidade de modelos de produção agrícola e pecuária são dependentes do ambiente de produção, o qual pode ser alterado, parcialmente, pelas técnicas de manejo disponíveis. Há fatores de ambiente que não podem ser alterados pelo manejo, como o clima e algumas características do solo, tal como a textura. Nesse sentido, é relevante conhecer as classes de solo predominantes nas áreas agrícolas e pecuárias, reconhecendo as suas potencialidades e limitações. Esse conhecimento associado ao padrão climático da região é básico para delinear modelos de produção e manejo sustentáveis no longo prazo, respeitando as características intrínsecas do solo.

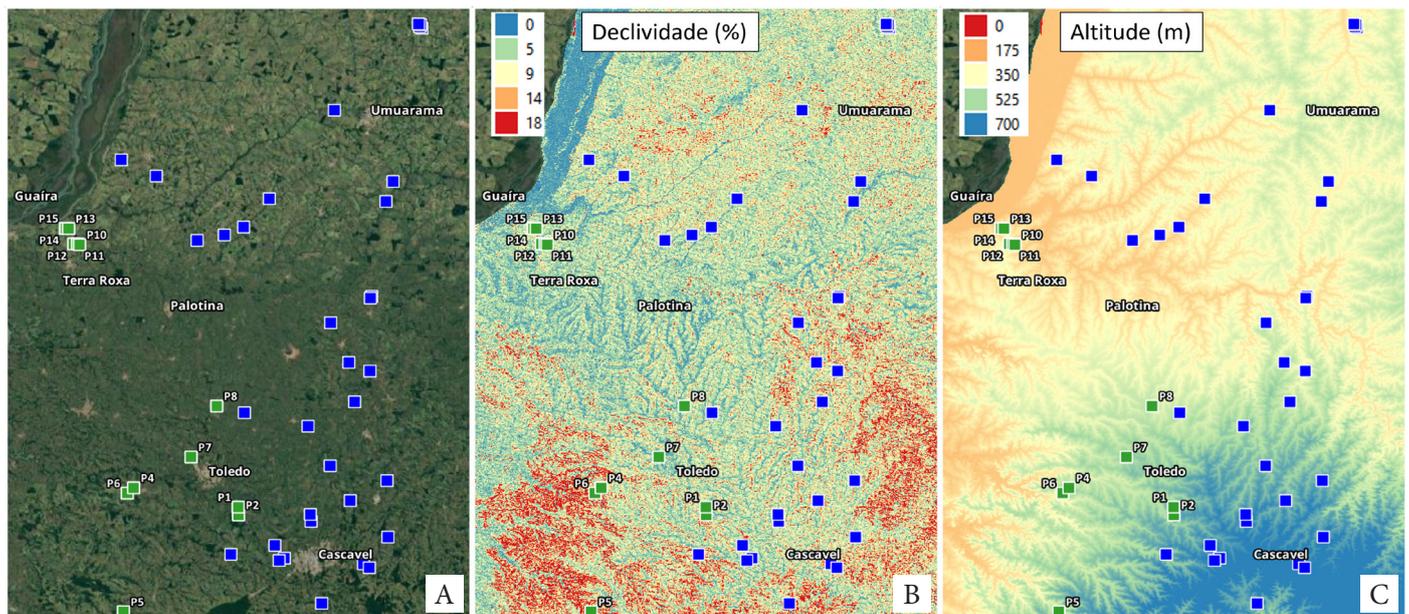
Este trabalho visa analisar alguns perfis de solo das regiões oeste e noroeste do Paraná. Para auxiliar nas análises, discussões e recomendações relacionadas ao uso e manejo do solo em sistemas de produção mais representativos dessas regiões serão utilizadas informações coletadas nos perfis de solo desta *1ª Reunião de Classificação e Correlação de Solos e Vegetação Fluvial (RCCSVF)* e em estudos que vêm sendo desenvolvidos na região pelo projeto Ação Integrada de Solo e Água (AISA), financiado por Itaipu Binacional, além de outros projetos conduzidos pela Embrapa Soja e IDR-Paraná.

### Localização e características dos perfis avaliados

Os perfis denominados P1 a P8 estão localizados sobre material de origem derivado de rochas eruptivas (basalto), enquanto os perfis de P10 a P15 estão localizados sobre rochas sedimentares (arenito) (Figura 1). As informações sobre os perfis dos solos avaliados na *1ª RCCSVF*, previamente apresentadas no artigo *Guia de campo: descritivo de solos e vegetação fluvial*, foram reorganizadas em camadas de 0–20 cm e 20–40 cm para permitir recomendações relacionadas à fertilidade e ao manejo do solo (Tabela 1). Foram recalculados os seguintes indicadores químicos, também utilizados nas áreas avaliadas pelo projeto AISA: matéria orgânica do solo (MOS), teores de P e K e saturação da CTC por bases (V%) na camada de 0–20 cm e saturação por Al (m%) e teor de Ca na camada de 20–40 cm. A água disponível foi calculada com base nos teores de areia, silte e argila, segundo Teixeira et al. (2021). Os perfis de solos derivados de rochas eruptivas apresentaram teores de água disponíveis nos níveis AD4 e AD5, enquanto nos solos derivados do arenito eles variaram entre AD1 e AD3, em acordo com a variação granulométrica observada nos perfis de solo.

As áreas avaliadas pelo projeto AISA são representadas por glebas agrícolas típicas da produção de grãos nas regiões oeste e noroeste do PR. Parte das áreas aqui reportadas se referem àquelas amostradas em 2021/2022 por Franchini et al. (2023a). Segundo Deral (2023), na região abrangida pela *1ª RCCSVF* e pelo projeto AISA, considerando os 69 municípios dos núcleos regionais de Cascavel, Toledo e Umuarama, durante a safra 2022/2023, 98% da área cultivada com grãos no verão foi ocupada por soja e, no outono-inverno, 55, 91% e 65% da área de soja foi utilizada com milho segunda safra, respectivamente. No núcleo

regional de Cascavel, a segunda cultura mais importante no outono-inverno foi o trigo (33%). Esses números indicam o baixo nível de diversificação de culturas na região.



**Figura 1.** Distribuição espacial dos perfis de solo (P1 a P15) (pontos verdes) e dos pontos monitorados pelo projeto Aisa (pontos azuis) na região da 1ª Reunião de Correlação e Classificação de Solos e Vegetação Fluvial (A), além das declividades (B) e das altimetrias (C).

**Tabela 1.** Características do solo e interpretação agrônômica nos perfis avaliados nas regiões oeste e noroeste do Paraná. Classes de interpretação para os indicadores de qualidade do manejo e da fertilidade do solo - perfis da 1ª RCCSVF - estabelecidos por Debiasi et al. (2021, 2022).

Perfis	Classe de Solo	Município	Província	Altitude	MOS	K	V	m	P	AD	Classes
					(g dm <sup>-3</sup> )	Cmolc (g dm <sup>-3</sup> )	(%)	(%)	(mg dm <sup>-3</sup> )	(mm cm <sup>-1</sup> )	
P1	LATOSSOLO VERMELHO	Cascavel	Convexada	625	45,92	0,19	56,4	25,0	22,7	0,94	AD4
P2	NITOSSOLO VERMELHO	Cascavel	Convexada	565	33,45	0,41	57,0	0,0	10,5	1,00	AD4
P4	LUVISSOLO CRÔMICO	Ouro Verde do Oeste	Patamarizada	505	26,04	0,16	74,4	0,0	3,7	1,04	AD4
P5	NEOSSOLO REGOLÍTICO	Ramilândia	Patamarizada	480	38,89	0,95	78,5	0,0	6,4	1,13	AD5
P6	LUVISSOLO EBÂNICO	Ouro Verde do Oeste	Patamarizada	350	31,73	0,45	79,5	0,0	0,6	0,97	AD4
P7	LATOSSOLO VERMELHO	Toledo	Convexada	540	33,27	0,11	36,5	14,4	21,4	0,83	AD4
P8	PLINTOSSOLO PÉTRICO	Assis Chateaubriand	Convexada	485	27,04	0,49	58,4	3,5	10,8	1,02	AD4
P10	ARGISSOLO VERMELHO	Terra Roxa	Convexada	342	14,79	nd	41,0	0,0	6,6	0,67	AD3
P11	ARGISSOLO VERMELHO	Terra Roxa	Convexada	321	13,42	nd	58,0	0,0	13,5	0,64	AD3
P12	PLINTOSSOLO ARGILÚVICO	Terra Roxa	Convexada	285	12,38	0,07	16,2	29,0	1,4	0,42	AD1
P13	LATOSSOLO VERMELHO	Terra Roxa	Convexada	316	10,66	nd	25,0	0,0	5,3	0,62	AD3
P14	ARGISSOLO AMARELO	Terra Roxa	Convexada	288	6,71	nd	40,0	10,0	20,9	0,59	AD2
P15	PLANOSSOLO HÁPLICO	Terra Roxa	Convexada	285	18,75	nd	55,0	38,0	4,3	0,64	AD3

Nd: não determinado.

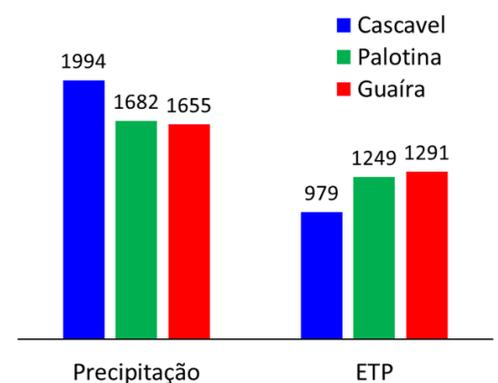
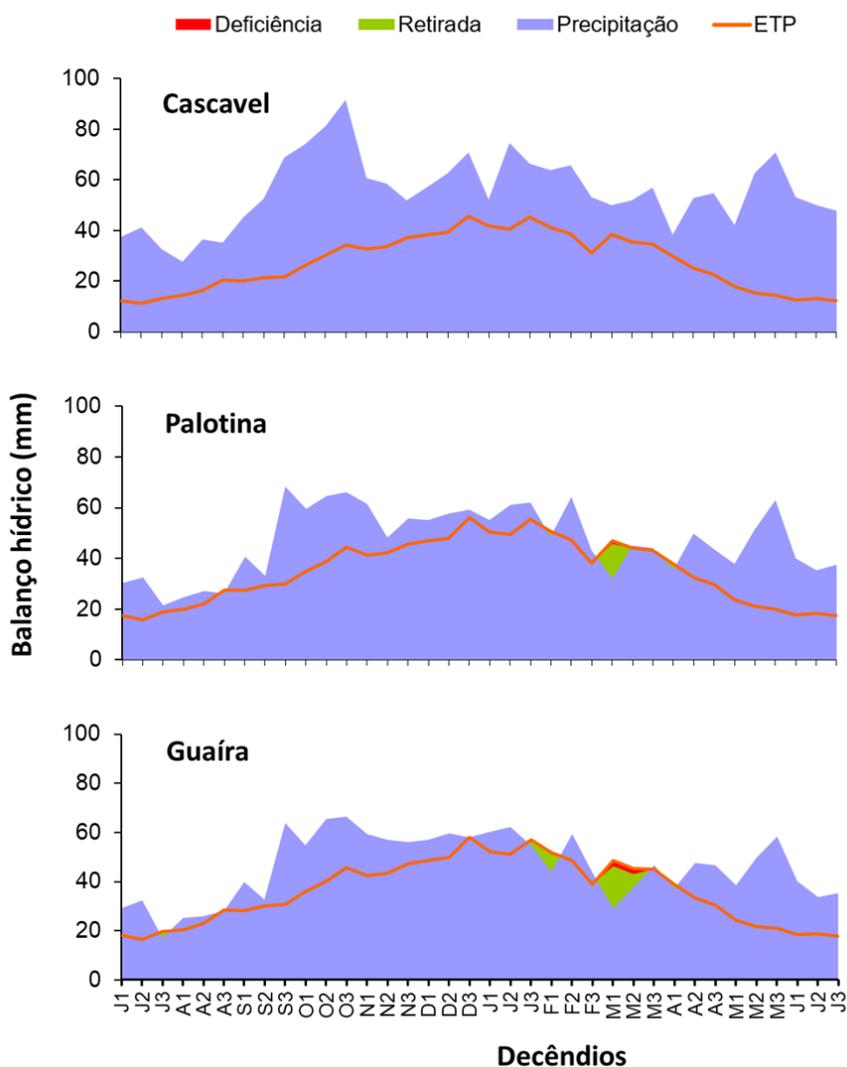
Legenda de cores: ■ Muito Ruim/Ruim ■ Regular ■ Muito bom/bom

As glebas avaliadas no âmbito do projeto AISA representaram principalmente as classes de solos dos Latossolos e Nitossolos nas rochas eruptivas e Latossolos e Argissolos no arenito (vide artigo *Solos da Bacia Hidrográfica Paraná III e parte da Bacia Hidrográfica Piquiri*). Nesse sentido, os perfis representativos para essas classes de solos seriam o P1, P2 e P7 nas rochas eruptivas e o P10, P11, P13 e P14 no arenito, todos na Província Convexada (vide artigo *Províncias geomorfológicas da área foco da 1ª RCCSVF: características e funcionalidades*). No caso da Província Patamarizada, onde as atividades de pecuária de corte e

de leite têm maior representatividade, os perfis mais relevantes são o P4 e P5, representando as classes de Luvisso e Neossolo, respectivamente. As Províncias Convexada e Patamarizada ficam mais bem evidenciadas no mapa de declividade, onde se destaca a Província Patamarizada nas áreas de maior declividade, na parte inferior esquerda do mapa (Figura 1).

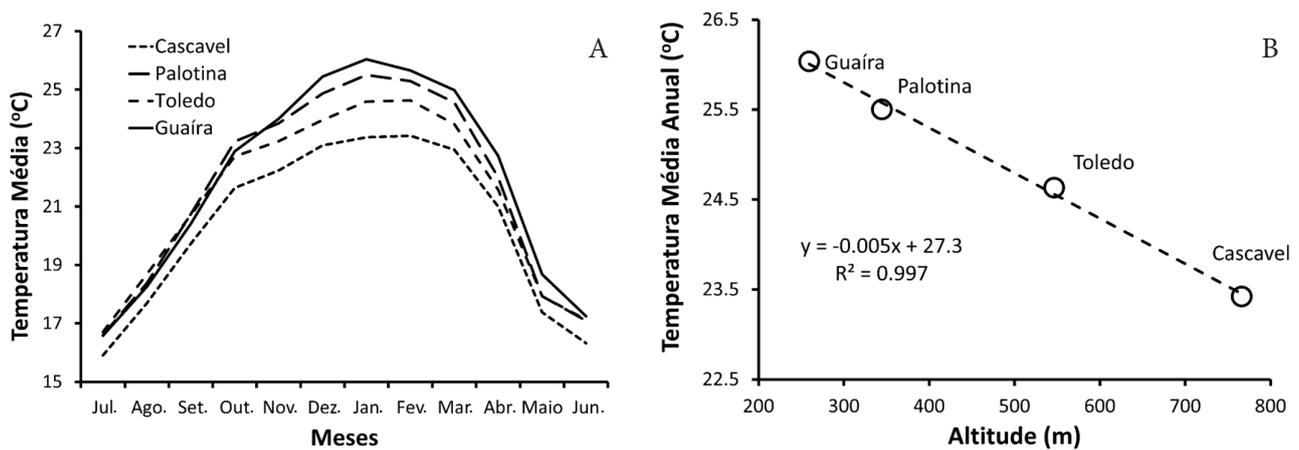
## Características climáticas das regiões avaliadas

A região da 1ª RCCSVF se caracteriza por duas condições climáticas: Cfa e Cfb (classificação de Köppen) (vide artigo *Caracterização climática da Bacia Hidrográfica Paraná III – BHP III e parte da Bacia Hidrográfica Piquiri – BHP*). Essa diferenciação climática também fica evidenciada no balanço hídrico climatológico (Figuras 2 e 3) e na variação da temperatura média mensal e anual das três cidades tomadas como referência na região (Figura 4). O balanço hídrico decendial do período de 1989 a 2020 mostra que a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico durante a safra de verão é menor em Cascavel do que em Palotina e Guaíra. Esse comportamento é determinado pela diferença entre a precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial (ETP). A diferença entre a precipitação pluvial e a ETP em Cascavel é a maior entre os municípios, por haver maior pluviosidade e menor ETP. Esse comportamento está associado, em parte, à variação da altitude (vide artigo *Províncias geomorfológicas da área foco da 1ª RCCSVF: características e funcionalidades*) e, conseqüentemente, da temperatura média nas diferentes regiões (Figuras 4A e 4B). Essa característica climática é importante porque indica que a possibilidade de perdas



**Figura 3.** Médias anuais de precipitação e evapotranspiração potencial (ETP), em mm, durante o intervalo de 1989 a 2020, nas cidades de Cascavel, Palotina e Guaíra.

**Figura 2.** Balanço hídrico climatológico decendial de julho a junho no período de 1989 a 2020, nas cidades de Cascavel, Palotina e Guaíra. Balanço hídrico elaborado pelo Dr. José Renato Bouças Farias, da área de Ecofisiologia da Embrapa Soja.



**Figura 4.** Temperatura média mensal (A) e temperatura média anual em função da altitude (B), nos municípios de Guaíra, Palotina, Toledo e Cascavel.

**Fonte:** Dados fornecidos pelo Dr. Pablo Nitsche da Área de Agrometeorologia do IDR-Paraná.

de produtividade por deficiência hídrica em Palotina é substancialmente maior que aquela em Cascavel, mesmo considerando que a textura e o tipo de solo sejam praticamente os mesmos nas duas situações. Por outro lado, Palotina e Guaíra são bastante similares em termos de pluviosidade e ETP. No entanto, a mudança no material de origem do solo de rochas eruptivas para arenito influencia a capacidade de armazenamento de água, o que fica evidenciado nos valores das classes de AD, especificados na Tabela 1, com os solos derivados de rochas eruptivas ficando nas classes AD4 e AD5, enquanto os derivados do arenito nas classes AD1, AD2 e AD3.

No município de Terra Roxa, onde estão localizados os perfis da 1ª RCCSVF e nos municípios de Altônia, Iporã, Cafezal do Sul, Perobal, Maria Helena e Umuarama, onde estão localizadas as glebas do projeto AISA, todos sobre solos derivados do arenito, além da maior probabilidade de restrição hídrica pela menor quantidade de água disponível, as temperaturas e a ETP são mais elevadas em relação às glebas sobre solos derivados de rochas eruptivas (Nitsche et al., 2019). Com isso, há maior dificuldade na produção de biomassa na entressafra da soja, principalmente com culturas anuais. Além disso, em função das altas temperaturas, a decomposição da palhada é acelerada, o que se reflete em menor porcentagem de cobertura do solo, especialmente na sucessão soja/milho segunda safra, em que há um intervalo de quase 90 dias sob pousio, entre a colheita do milho e a semeadura da soja.

De forma geral, no sentido Cascavel para Terra Roxa, existe um gradiente de fatores ambientais relacionados ao clima e ao solo que aumentam o risco da atividade agrícola, com maior impacto nos períodos de deficit hídrico, muito comuns na região, tornando essenciais as ações de mitigação relacionadas ao manejo do solo. O impacto das práticas de manejo do solo sobre a redução de riscos da atividade agropecuária frente ao estresse hídrico e, ou térmico aumenta à medida em que há redução da altitude e aumento dos teores de areia no solo.

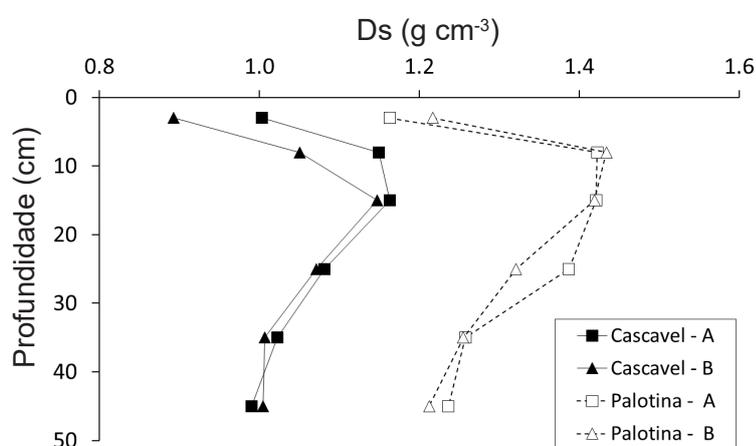
## Mineralogia, carbono orgânico e compactação do solo

A estrutura do solo nos perfis avaliados variou de blocos a granular (vide artigo *Guia de campo: descritivo de solos e vegetação fluvial*). Os Latossolos da região de Cascavel apresentaram predomínio da estrutura granular, o que pode estar associado à presença da gibbsita e de óxidos de ferro em relação à caulinita (vide artigo *Mineralogia da fração argila e suas relações com o comportamento dos solos da 1ª RCCSVF*). Por outro lado, os Latossolos e os Nitossolos da região de Palotina apresentaram estrutura em forma de blocos, fato que pode estar associado à dominância de caulinita e às menores quantidades de gibbsita e óxidos de ferro. A estrutura em blocos é mais favorável à compactação em condições de alta umidade. Essa relação dos minerais com a estrutura do solo foi observada em estudos realizados por Ajayi et al. (2009, 2010), em solos da região do Cerrado Brasileiro. Ferreira et al. (1999) também definiram a importância da caulinita e da gibbsita para a estrutura de solos da região Sudeste do Brasil. Esse comportamento confirma o modelo inicialmente proposto por Resende (1985), segundo o qual os óxidos de Al

e Fe, juntamente com a matéria orgânica, tendem a desorganizar as partículas em escala microscópica, conferindo ao solo a estrutura do tipo granular.

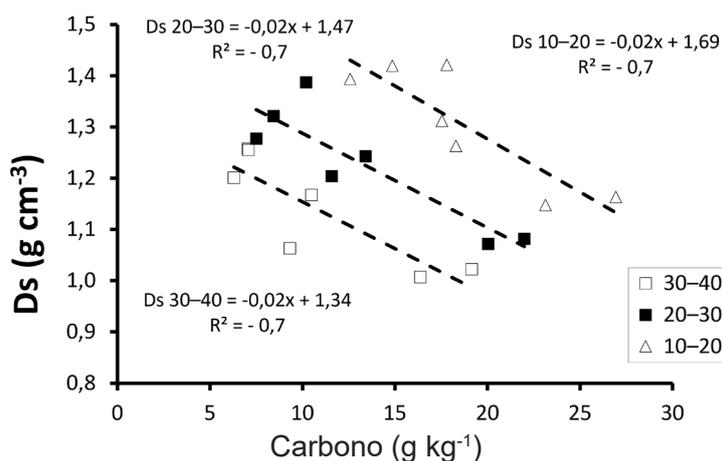
A degradação da estrutura do solo é uma das principais consequências da intensificação do uso agrícola dos solos tropicais e subtropicais e essa também é a realidade da região da 1ª RCCSVF. O predomínio do modelo de sucessão soja/milho segunda safra confere pouca produção de biomassa, sobretudo de raízes, além de intensificar o tráfego de máquinas em momentos críticos para a compactação, com a colheita da soja e a semeadura do milho sendo realizados em meses com maior precipitação pluviométrica - janeiro, fevereiro e março (Figura 2). O tráfego de máquinas com o solo na condição plástica facilita a formação de uma camada de maior densidade que normalmente está localizada na profundidade de 10-20 cm. Além disso, entre a colheita do milho segunda safra e a semeadura da soja há um período de pousio, geralmente de 60 a 90 dias, em que não há produção significativa de biomassa pelas plantas, quando cultivadas. Esse cenário é agravado pela escassez de chuvas e baixas temperaturas no período (vide artigo *Caracterização climática da Bacia Hidrográfica Paraná III – BHP III e parte da Bacia Hidrográfica Piquiri – BHP*), o que compromete a produção de biomassa (Figuras 2, 3 e 4).

Medidas de densidade do solo realizadas pela Embrapa em glebas de produção de soja e milho segunda safra, típicas da região, localizadas nos municípios de Cascavel e Palotina indicam que a mineralogia pode estar desempenhando papel importante no comportamento da suscetibilidade do solo à compactação (Figura 5). Os solos avaliados apresentam textura muito argilosa, porém as medidas de densidade foram muito superiores nos solos de Palotina quando comparados aos de Cascavel, inclusive superando o valor crítico de  $1,33 \text{ g dm}^{-3}$ , definido por Torres e Saraiva (1999) como restritivo ao crescimento radicular da soja, em Palotina. Valores de densidade do solo mais baixos para Latossolos gibbsíticos e mais altos para Latossolos caulíníticos têm sido reportados na literatura e foram discutidos com mais detalhes por Ferreira et al. (1999) (vide artigo *Mineralogia da fração argila e suas relações com o comportamento dos solos da 1ª RCCSVF*).



**Figura 5.** Densidade de solos derivados de rochas eruptivas na região oeste do Paraná. Propriedades representativas do sistema soja/milho segunda safra avaliadas na safra 2020/2021, nos municípios de Cascavel e Palotina.

Em um conjunto com maior amostragem de solos da região oeste do Paraná, onde foram incluídos os municípios de Nova Aurora e Cafelândia, além de Cascavel e Palotina, também foi observada relação inversa entre o teor de carbono orgânico e a densidade do solo nas camadas abaixo de 10 cm. Desse modo, o ambiente mais favorável à conservação do carbono, determinado pelas menores temperaturas de Cascavel quando comparadas àsquelas de Palotina (Figuras 4A e 4B), contribui para o maior teor de carbono no solo que, por sua vez, aumenta a resiliência do solo ao processo de compactação (Figura 6).



**Figura 6.** Relação entre a densidade do solo e o teor de carbono nas camadas de 10–20 cm, 20–30 cm e 30–40 cm em solos muito argilosos derivados de rochas eruptivas na região oeste do Paraná. Os pontos representam glebas agrícolas do sistema soja/milho segunda safra, avaliadas na safra 2020/2021, nos municípios de Cascavel, Nova Aurora, Cafelândia e Palotina.

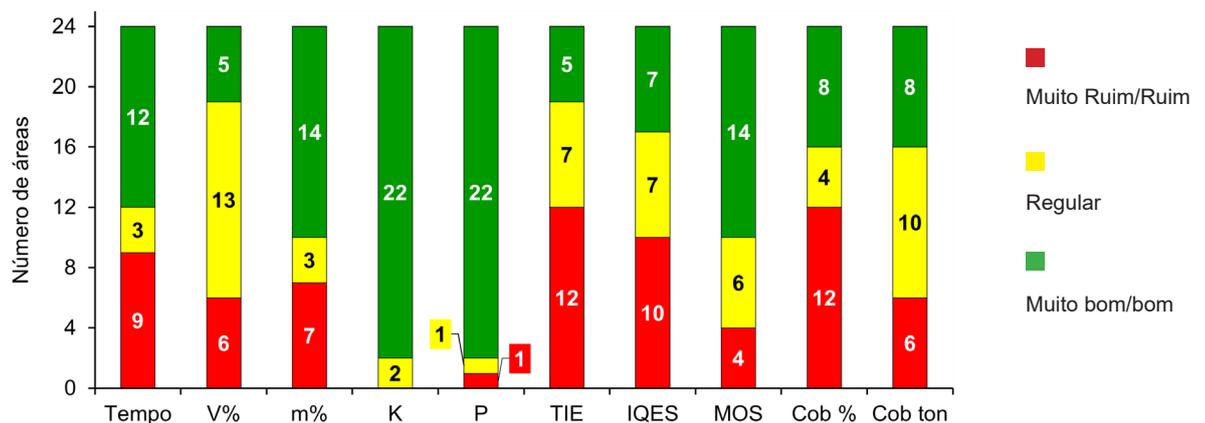
## Indicadores de qualidade do solo para avaliação dos perfis e das glebas agrícolas nas regiões oeste e noroeste do Paraná

O enquadramento nas classes de interpretação foi feito de acordo com os critérios estabelecidos na Tabela 2. Nas Figuras 7 e 8 observa-se o enquadramento nas classes de interpretação “muito ruim/ruim”, “regular” e “muito bom/bom”, para dez indicadores utilizados na avaliação da qualidade do manejo e da fertilidade do solo em 37 propriedades nas regiões oeste e noroeste do Paraná, em solos derivados de rochas eruptivas (24 áreas) e sedimentares (13), respectivamente, no âmbito do projeto AISA. Todas as áreas apresentaram indicadores classificados como “muito ruim/ruim”, que são limitantes à fertilidade integral do solo e, assim, ao desempenho do sistema de produção. Esses resultados revelam a existência de muitas oportunidades de melhorias na qualidade do manejo do solo. Essas melhorias envolvem práticas já validadas pela pesquisa e amplamente conhecidas pelos produtores, tais como a calagem com base nos laudos de análise química do solo e a utilização de modelos de produção com maior diversidade de espécies e maior produção de biomassa. Ressalta-se que o aumento da fertilidade do solo possibilita maior produtividade de grãos e estabilidade de produção face à ocorrência de períodos de seca ou excesso de chuvas, além de otimizar os custos de produção e reduzir os impactos ambientais da agricultura.

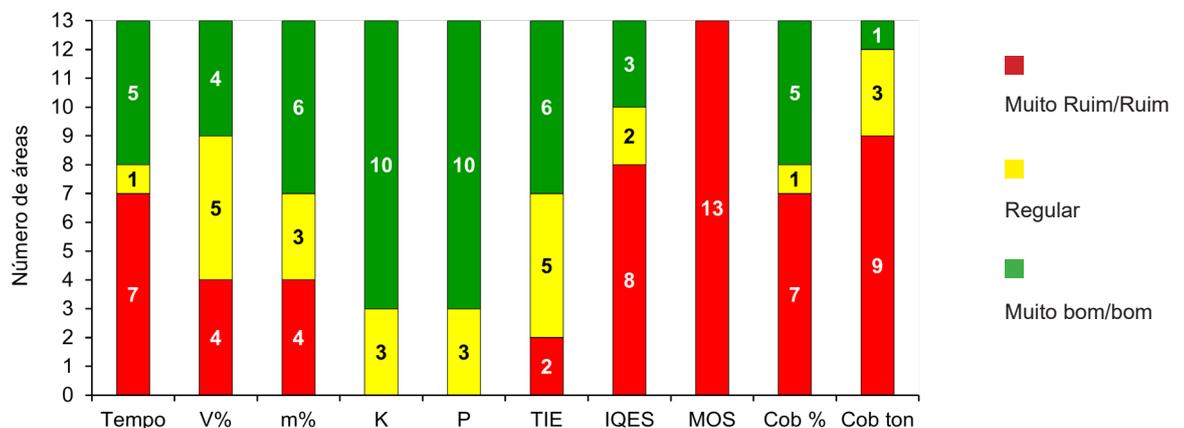
**Tabela 2.** Classes de interpretação para os indicadores de qualidade do manejo e da fertilidade solo.

Classe de interpretação	Tempo (anos)	V%		m%	K (cmolc dm <sup>-3</sup> )		P (mg dm <sup>-3</sup> )		TIE (mm h <sup>-1</sup> )	IQES	MOS (g dm <sup>-3</sup> )		Cobertura	
		a	b		a	b	a	b			a	b	%	(t ha <sup>-1</sup> )
Muito Ruim	Mín.	Mín.	Mín.	Máx.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	1,0	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.
	2	30	40	20	0,05	0,10	6,0	3,0	19,9	1,9	10	20	35	1,9
Ruim	3	31	41	19	0,06	0,11	6,1	3,1	20,0	2,0	11	21	36	2,0
	4	40	50	16	0,10	0,15	12,0	6,0	39,9	2,9	15	28	50	3,9
Regular	5	41	51	15	0,11	0,16	12,1	6,1	40,0	3,0	16	29	51	4,0
	7	50	60	11	0,15	0,25	18,0	9,0	59,9	3,9	20	35	65	5,9
Bom	8	51	61	10	0,16	0,26	18,1	9,1	60,0	4,0	21	36	66	6,0
	10	60	70	6	0,20	0,35	24,0	12,0	79,9	4,9	30	42	80	7,9
Muito Bom	12	61	71	5	0,21	0,36	24,1	12,1	80,0	5,0	31	43	81	8,0
	Máx.	Máx.	Máx.	Mín.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	6,0	Máx.	Máx.	100	Máx.

a = solo < 40% de argila; b = solo > 40% de argila; tempo = anos desde o último revolvimento do solo; V% = saturação por bases (0-20 cm); m% = saturação por alumínio; K = teor de potássio (0-20 cm); P = teor de fósforo (0-20 cm); TIE = taxa de infiltração estável; IQES = índice de qualidade da estrutura do solo (0-25 cm); MOS = teor de matéria orgânica do solo (0-20 cm); Critérios estabelecidos previamente por Debiasi et al. (2021, 2022).



**Figura 7.** Número de áreas agrícolas avaliadas na região oeste do Paraná (safras 2021/2022 e 2022/2023), enquadradas nas classes “muito ruim/ruim”, “regular” e “muito bom/bom”, para dez indicadores de qualidade de manejo do solo e da fertilidade. Solos derivados de rochas eruptivas nos municípios de Cascavel, Santa Tereza do Oeste, Corbélia, Cafelândia, Assis Chateaubriand, Formosa do Oeste, Iracema do Oeste, Jesuítas e Nova Aurora. Tempo = anos desde o último revolvimento do solo; V% = saturação por bases; m% = saturação por alumínio; K = teor de potássio; P = teor de fósforo; TIE = taxa de infiltração estável; IQES = índice de qualidade da estrutura do solo; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = cobertura do solo por resíduos vegetais; Cob ton = cobertura do solo em massa.



**Figura 8.** Número de áreas agrícolas avaliadas na região noroeste do Paraná (safra 2021/2022), enquadradas nas classes “muito ruim/ruim”, “regular” e “muito bom/bom”, para dez indicadores de qualidade de manejo do solo. Solos derivados do arenito nos municípios de Altônia, Iporã, Cafezal do Sul, Perobal, Maria Helena e Umuarama. Tempo = anos desde o último revolvimento do solo; V% = saturação por bases; m% = saturação por alumínio; K = teor de potássio; P = teor de fósforo; TIE = taxa de infiltração estável; IQES = índice de qualidade da estrutura do solo; MOS = teor matéria orgânica do solo; Cob % = cobertura do solo por resíduos vegetais; Cob ton = cobertura do solo em massa.

Com relação aos indicadores de fertilidade química nas glebas do projeto AISA, os teores de P e K na camada 0-20 cm foram classificados como adequados (“muito bom/bom”) em 32 áreas (89%), nos solos derivados de rochas eruptivas e do arenito (Figuras 7 e 8). Entre as áreas amostradas, apenas uma apresentou o teor de P “muito ruim/ruim”, o que não ocorreu para o teor de K. Como todas as áreas avaliadas pelo projeto AISA estão sendo utilizadas para a produção de grãos, seja em sistema exclusivo ou em sistemas integrados lavoura-pecuária, principalmente no arenito, os resultados indicam que as áreas vêm recebendo quantidades consideradas satisfatórias de ambos os nutrientes.

No caso dos perfis da 1ª *RCCSVF*, o P foi o nutriente mais limitante, apresentando teores nos níveis “muito ruim/ruim” em seis casos, sendo quatro deles no arenito (Tabela 1). No caso do K, chama a atenção o alto teor deste nutriente no perfil P5 (Neossolo Regolítico), provavelmente por se tratar de um solo jovem, com a presença de minerais facilmente alteráveis nas frações mais grossas e argilominerais do tipo 2:1, em geral, nas frações mais finas (Santos et al., 2012). Essa característica confere aos solos uma reserva mineral potencial, especialmente de K, para as plantas (Oliveira, 2008). No caso dos perfis derivados de arenito, dos três que estavam sob áreas de lavoura, em apenas um havia resultado para o teor de K no solo e, neste caso, este foi considerado inadequado (“muito ruim/ruim”) (Tabela 1). Nos demais perfis o solo estava sob pastagem em dois casos e sobre vegetal natural em outro. Nestas condições, devido à baixa capacidade de troca de cátions, associada aos baixos teores de argila e de matéria orgânica, a expectativa é de que os teores também sejam baixos.

Nas glebas do projeto AISA, o valor médio de V% foi classificado como “muito bom/bom” somente em nove áreas (25%), indicando que as demais 27 áreas (75%) necessitam de calagem para correção da acidez na camada 0-20 cm (Figuras 7 e 8). Considerando o critério da V% de 70 para os solos derivados de rochas eruptivas e 60 para o arenito (Oliveira Junior et al., 2020) e o uso de calcário com PRNT de 100%, a quantidade média necessária à calagem nas áreas foi 2,4 t ha<sup>-1</sup>, variando entre 1,4 a 4,1 t ha<sup>-1</sup>, e 0,9 t ha<sup>-1</sup>, variando de 0,5 a 1,6 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Aparentemente, em muitas situações, a calagem vem sendo mais negligenciada nos solos de rochas eruptivas, em relação aos solos do arenito.

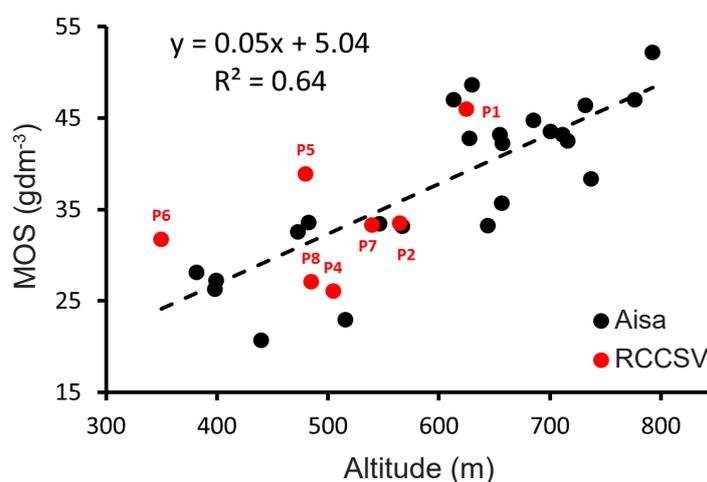
No caso dos perfis da 1ª *RCCSVF* de solos derivados de rochas eruptivas localizados na Província Patamarizada, os valores de V% foram maiores que 70%, indicando que neste ambiente de solos jovens e pouco desenvolvidos o material de origem é rico em cátions básicos (Tabela 1). Provavelmente, estes valores elevados de saturação não tenham sido obtidos por meio da aplicação de corretivos, uma vez que são áreas ocupadas por pastagem, com restrição ao uso agrícola devido à mecanização e à conservação do solo, ou seja com baixo investimento em insumos. Os demais perfis de solos derivados de rochas eruptivas apresentaram necessidade de correção, sendo mais crítica no perfil P7, onde a elevação da saturação por bases a 70% demandaria a aplicação de 4,8 t ha<sup>-1</sup> de calcário, uma quantidade que supera o limite de 4 t ha<sup>-1</sup> quando se considera a qualidade de aplicação dos equipamentos utilizados atualmente. No caso dos perfis derivados de arenito, a condição de acidez superficial foi considerada “muito ruim/ruim” nos perfis P12, P13 e P14 e ficou próximo deste limite no perfil P10, demandando para a elevação da saturação por bases a 60% a aplicação de 2,0, 1,9, 0,8 e 1,3 t ha<sup>-1</sup> de corretivo, respectivamente. Ressalta-se que os perfis P12 e P13 estavam sobre o uso com pastagem, onde o investimento em corretivos normalmente é mais baixo.

Uma desvantagem da condição de acidez excessiva (“muito ruim/ruim”), observada em quatro perfis e em dez glebas, em solos provenientes de rochas eruptivas e de arenito, além dos prejuízos ao crescimento das culturas e pastagens, é a dificuldade de corrigir a acidez em profundidade quando a camada superficial também apresenta alto nível de acidez. Franchini et al. (2023a) observaram que a acidez em profundidade é proporcional à acidez na superfície do solo, desta forma é interessante que se mantenham os níveis de acidez dentro dos valores considerados adequados na superfície do solo, para também reduzir a acidez em profundidade, que é um fator limitante ao crescimento das raízes e aumenta a probabilidade de perdas de produtividade sob condições de estresse hídrico, por limitar o crescimento radicular.

No mesmo sentido, nas glebas do projeto AISA o valor médio de m% foi classificado como “muito ruim/ruim” em onze áreas (31%), apontando a necessidade de uso de gesso agrícola para a redução da toxidez de alumínio na camada subsuperficial 20-40 cm (Figuras 7 e 8). Nos perfis da 1ª *RCCSVF* o valor de m% foi restritivo (“muito ruim/ruim”) em dois perfis nos solos derivados de rochas eruptivas (P1 e P7) e dois perfis no arenito (P12 e P15), todos localizados na Província Convexada (Tabela 1). Os perfis em paisagens sobre rochas eruptivas representam áreas tradicionais de produção de grãos e esta característica é preocupante para a estabilidade de produção sob condições de deficiência hídrica, uma vez que o alumínio é um cátion tóxico que limita o crescimento das raízes, o que restringe o tamanho do reservatório de água às culturas. Os perfis de solos sobre o arenito representam áreas sob pastagem e floresta, espécies vegetais que apresentam maior tolerância à toxidez por alumínio. Com base no critério estabelecido por Sousa e Lobato (2004), para determinar a quantidade necessária de gesso agrícola [NG = teor de argila (%) x 50], a necessidade média de gesso nos solos derivados de rochas eruptivas (60% a 70% de argila) seria de 3 a 3,5 t ha<sup>-1</sup>, enquanto no arenito (10% a 25% de argila) seria de 0,5 a 1,25 t ha<sup>-1</sup>.

A acidez do solo é um dos principais fatores que determinam a disponibilidade e a eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes, bem como a solubilização de elementos tóxicos, como o alumínio. Portanto, a sua correção é fundamental para garantir altas produtividades de grãos com estabilidade e otimização dos custos de produção. Pela elevada relação benefício/custo da correção da acidez e por se tratar de práticas amplamente conhecidas pelos produtores, a alta proporção de lavouras apresentando necessidade de correção do solo nas regiões oeste e noroeste do Paraná é surpreendente, e exige da assistência técnica um forte trabalho de conscientização dos produtores a respeito da sua importância. A realização de análises químicas do solo, buscando verificar a necessidade ou não de calagem e, ou gessagem e embasar doses e métodos de aplicação, são aspectos que também devem ser observados pelos técnicos e produtores.

Nas glebas do projeto AISA, teores adequados de MOS (“muito bom/bom”) na camada 0-20 cm foram observados em apenas 14 glebas localizadas em solos derivados de rochas eruptivas, com textura muito argilosa, o que equivale a cerca de 58% do total de áreas amostradas neste material de origem (Figura 7). Apenas o perfil P4 da 1ª RCCSVF apresentou teor “muito ruim/ruim” de MOS, neste material de origem, provavelmente em função da posição topográfica favorável à perda de material orgânico por escoamento superficial de água e sedimentos (meia encosta). Da mesma forma, o teor de MOS nas áreas avaliadas sobre rochas eruptivas foi positivamente relacionado com a variação da altitude, a qual imprime variações importantes na temperatura (vide artigo *Solos da Bacia Hidrográfica Paraná III e parte da Bacia Hidrográfica Piquiri*), com as áreas localizadas em Cascavel (700 metros) apresentando teores médios de MOS maiores que aqueles de áreas localizadas em Formosa do Oeste (400 metros) (Figura 9).



**Figura 9.** Relação entre a altitude e o teor de matéria orgânica do solo, na camada 0-20 cm, em 24 glebas agrícolas (AISA; Ação Integrada de Solo e Água) avaliadas na região oeste do Paraná (safras 2021/2022 e 2022/2023) e sete perfis de solo (1ª RCCSVF). Glebas agrícolas de solo com textura muito argilosa, derivados de rochas eruptivas, localizadas nos municípios de Cascavel, Santa Tereza do Oeste, Corbélia, Cafelândia, Assis Chateaubriand, Formosa do Oeste, Iracema do Oeste, Jesuítas e Nova Aurora.

Um fator importante associado à altitude é a variação na precipitação pluviométrica anual (Figura 2) (vide artigo *Caracterização climática da Bacia Hidrográfica Paraná III - BHP III e parte da Bacia Hidrográfica Piquiri – BHP*). Martin Neto et al. (2023) observaram que a variação da precipitação pluviométrica em solos de uma climosequência estava associada com o aumento do conteúdo de radicais livres do tipo semiquinona, detectados pela técnica de ressonância paramagnética eletrônica, e que é um indicador do grau de humificação das substâncias húmicas e da matéria orgânica dos solos. Isso indica que o maior potencial de produção de biomassa e a maior atividade microbiana associada com o aumento da precipitação pluvial resultaria em teores mais elevados de MOS mais humificada.

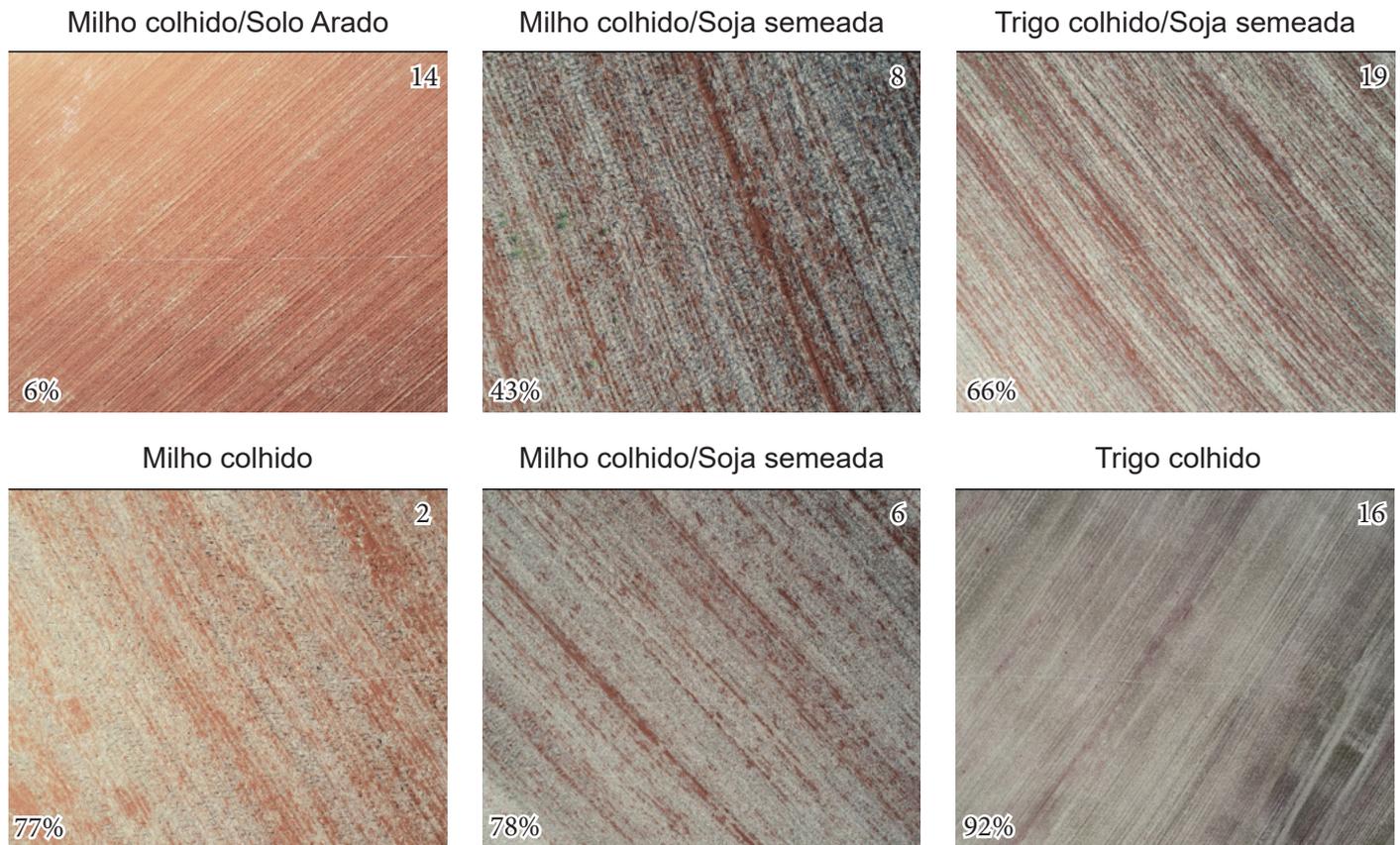
Todas as glebas do projeto AISA e todos os perfis da 1ª RCCSVF localizados em relevos sobre o arenito foram classificadas como “muito ruim/ruim” em relação ao teor de MOS, exceto para o perfil P15 que estava

sob vegetação de floresta (Figura 8, tabela 1). Nesse sentido, esse resultado, de forma geral, está de acordo com o baixo teor de argila (< 25%) em locais de baixa altitude (em torno de 300 m) e com maior temperatura média anual, que favorecem a rápida decomposição dos resíduos vegetais produzidos. Assim, os menores teores de argila nos solos derivados do arenito conferem menor capacidade de estabilização química e física da MOS, resultando em maiores perdas na forma de gases (Six et al., 2002).

Cabe salientar que, mesmo nos solos muito argilosos derivados de rochas eruptivas, que naturalmente se caracterizam por um elevado potencial de estabilização e armazenamento de compostos orgânicos, os teores de MOS estão abaixo do mínimo considerado ideal (“regular” ou “muito ruim/ruim”) em dez das áreas avaliadas (Figura 7) e três perfis (Tabela 1). Além da relação da MOS com a textura, esses resultados indicam que a adição de material orgânico vegetal (palha e raízes) pelos modelos de produção predominantes nessas regiões não tem sido suficiente para proporcionar acúmulo de MOS em solos representativos para a produção de grãos. Isso também pode ser evidenciado nas glebas do projeto AISA, pelo predomínio de áreas avaliadas nas classes “muito ruim/ruim” e “regular”, tanto em termos do percentual de cobertura quanto na quantidade de resíduos cobrindo o solo, independentemente do tipo de material de origem do solo. No caso da porcentagem de cobertura, apenas oito áreas (33%) sobre rochas eruptivas e cinco áreas (42%) sobre arenito apresentaram cobertura de solo maior que 65%, que é a cobertura mínima considerada para atingir o nível “bom”. Em termos de quantidade de palha na superfície do solo, o número de áreas consideradas no nível “bom” se manteve em oito em solos derivados de rochas eruptivas, enquanto diminuiu para apenas uma para os derivados de arenito.

Nos dados apresentados, coletados pelo projeto AISA (Figuras 7 e 8), a cobertura do solo foi avaliada por meio de dois indicadores (porcentagem e massa), uma vez que a relação entre o potencial da palhada em cobrir o solo e a sua massa é amplamente variável conforme a espécie vegetal. Em geral, a capacidade da palha em cobrir o solo (% de cobertura por tonelada de palha) é menor nas espécies que apresentam caules ou colmos mais grossos e, ou resistentes, com folhas de decomposição relativamente rápida, como o milho, o sorgo, as crotalárias e o guandu. Além disso, cada um desses indicadores apresenta relação mais estreita com determinados processos associados à qualidade do manejo e à fertilidade do solo. Nesse sentido, a porcentagem de cobertura é mais importante para a dissipação da energia cinética da gota de chuva e, assim, para o controle da erosão. Por outro lado, a massa é determinante para o aumento dos teores de MOS e a ciclagem de nutrientes. Por sua vez, processos como a redução da temperatura do solo e das perdas de água por evaporação, a supressão física de plantas daninhas e o controle de algumas doenças (mofo-branco, por exemplo), têm associação com os dois indicadores. De qualquer modo, os resultados deste trabalho mostraram que ambos os indicadores apresentaram valores limitantes na maioria das áreas avaliadas, o que compromete todos os aspectos anteriormente enumerados e, conseqüentemente, a conservação do solo e a produtividade das culturas. Trabalhos conduzidos na Embrapa Soja demonstraram que a cobertura do solo com palha, em valores próximos a 100%, resultou em aumentos de produtividade da soja cujos valores situaram-se entre 6% e 34%, comparativamente à ausência total de cobertura, dependendo da espécie vegetal e da disponibilidade hídrica de cada safra (Balbinot Junior et al., 2017, 2020).

Na Figura 10 são apresentadas algumas imagens dos diferentes tipos de manejo comumente utilizados em sistema de produção de soja, trigo e milho e o correspondente percentual de cobertura do solo por resíduos vegetais (Franchini et al., 2023b). O percentual de cobertura do solo por resíduos vegetais variou de 6 a 92%. Os resultados foram agrupados em cinco principais tipos de manejo encontrados no momento da avaliação, com os seguintes valores médios de cobertura para cada um deles: milho colhido (77%); milho colhido/soja semeada (43% e 78%); milho colhido/solo arado (6%); trigo colhido (92%) e trigo colhido/soja semeada (66%). Com base nestes percentuais, pode-se inferir que a semeadura da soja em áreas de milho colhido proporcionou redução média de 14% na cobertura do solo por resíduos. A semeadura da soja em área coberta por resíduos de trigo reduziu a cobertura do solo em 29%. Também é interessante notar que a cobertura do solo com a palhada de milho, após a semeadura da soja, pode variar bastante mostrando uma amplitude entre 43% e 78%. Essa diferença pode estar relacionada com fatores como o intervalo entre a colheita do milho e a semeadura da soja, sendo a cobertura menor quanto maior esse intervalo e também com aspectos relacionados à qualidade da semeadura, tais como a velocidade de semeadura e regulagem da profundidade do disco de corte e do sulcador. Maiores velocidades de semeadura tendem a abrir sulcos maiores, aumentando a exposição do solo.



**Figura 10.** Fotos aéreas da superfície de talhões agrícolas representativos de sistemas de produção de soja, trigo e milho no momento da semeadura da soja, destacando os principais manejos observados. Os números no interior dos círculos brancos indicam o percentual de cobertura do solo.

Fonte: Franchini et al. (2023b).

O teor de MOS e a quantidade de palha na superfície do solo também podem estar sendo afetados pelo preparo do solo, conforme evidenciado pelo indicador “tempo”, avaliado no projeto AISA. Este indicador mede o intervalo de tempo desde o último preparo do solo que, em última análise, expressa o número de anos sob plantio direto contínuo (Figuras 7 e 8). Nesse sentido, foi observado um número importante de glebas, tanto em solos derivados das rochas eruptivas (38%) quanto do arenito (60%) que apresentaram os níveis “muito ruim/ruim”, que representam um preparo de solo em intervalos menores que cinco ou três anos, respectivamente (Tabela 2).

O preparo do solo, por meio de vários tipos de implementos, é fator determinante para a redução dos teores de MOS que, em geral, foram classificados como “muito ruim/ruim” nas glebas do projeto AISA e nos perfis da 1ª RCCSVF. A MOS é um dos principais componentes da fertilidade do solo, por determinar diversos atributos e processos físicos, químicos e biológicos (Bayer; Mielniczuk, 2008); formação e estabilização de agregados, essencial para a qualidade estrutural do solo; fornecimento e aumento da disponibilidade de alguns nutrientes, como o N, P e K; aumento da CTC; complexação de elementos tóxicos às culturas, como o alumínio; aumento da capacidade de retenção de água; e aumento da biomassa e da atividade biológica do solo (Franchini et al., 2007; Babujia et al., 2010). Em decorrência desses efeitos, aumentos de produtividade das culturas são frequentemente associados a teores mais elevados de MOS (Nicolodi et al., 2008; Costa et al., 2015; Debiasi et al., 2015; Lopes et al., 2018; Mendes et al., 2019). Portanto, o fato das áreas monitoradas nas regiões oeste e noroeste do Paraná, em sua maioria, apresentarem teores de MOS e porcentagem e quantidade de cobertura inferiores aos ideais é preocupante, apontando para a necessidade de utilização de modelos de produção que proporcionem maior diversidade biológica e aporte de palha e raízes, juntamente com a eliminação de operações de preparo do solo sem critério técnico. Salienta-se, ainda, que o aporte de N ao sistema, preferencialmente por via da fixação biológica (FBN), é outro processo essencial para sustentar o acúmulo de MOS (Diekow et al., 2005).

A TIE e o IQES são indicadores associados à qualidade física do solo e podem ser considerados como interrelacionados em sistema de plantio direto. De forma geral, uma boa estrutura do solo do ponto de vista das suas principais funções de armazenamento de água, fornecimento de oxigênio, crescimento radicular e suporte ao tráfego de máquinas ocorre em condições intermediárias do ponto de vista de indicadores tradicionais de qualidade física. Ou seja, um solo submetido ao preparo mecânico pode aumentar a infiltração de água e o crescimento das raízes num primeiro momento, porém é vulnerável à compactação pelo tráfego de máquinas e armazena pouca água, devido ao aumento de macroporos que favorecem o fluxo no perfil. No outro extremo, um solo compactado restringe o crescimento radicular, tem baixa capacidade de infiltração e de armazenamento d'água, porém é resistente à compactação. Na condição intermediária, o crescimento radicular não é restringido, o equilíbrio entre infiltração e armazenamento de água é otimizado e o solo ainda apresenta resistência à compactação. Dessa forma, é importante entender que existe um estado de qualidade física do solo que é o ideal para prevenir a degradação da estrutura e otimizar os processos associados ao potencial produtivo.

Os dados coletados no projeto AISA, em 24 glebas com solos derivados de rochas eruptivas, mostram que a TIE e o IQES foram enquadrados nas classes "muito ruim/ruim" em 12 e dez áreas, respectivamente, o que representou cerca de 50% e 42% das áreas (Figura 6). No caso das glebas de solos oriundos de arenito, os números foram dois e oito, para TIE e IQES, respectivamente, o que representou cerca de 17% e 67% (Figura 8). Aparentemente, existe uma associação importante entre a TIE e o IQES em função do tipo de material de origem. No caso de solos originários das rochas eruptivas, a perda de qualidade da estrutura está associada à redução da TIE. Por outro lado, no caso do arenito, a perda da qualidade da estrutura pode estar associada ao aumento da TIE. Isso pode fazer sentido quando se considera que solos derivados de rochas eruptivas são mais suscetíveis à compactação e que este processo tende a reduzir a TIE de forma direta. Por outro lado, os solos derivados do arenito possuem uma estrutura extremamente frágil que, quando degradada, dá origem a uma estrutura pulverizada, com baixo IQES, mas com elevada TIE.

A desagregação do solo resultante de práticas mecânicas de revolvimento do solo (gradagem leve ou pesada, aração com discos, escarificação e subsolagem) se reflete no aumento da TIE, em função do incremento do volume de macroporos, mas esse efeito normalmente apresenta curta duração, sobretudo em modelos de produção com baixa adição de material vegetal (Nicoloso et al., 2008; Girardello et al., 2011; Nunes et al., 2014; Drescher et al., 2016). Adicionalmente, o aumento excessivo do volume de macroporos, aliado à quebra da continuidade dos poros, pode reduzir o volume de água disponível às plantas (Moraes et al., 2018) e, conseqüentemente, diminuir a produtividade de grãos de culturas como a soja e o milho (Debiasi et al., 2010; Bertollo et al., 2021). Por sua vez, o rompimento dos agregados diminui a capacidade de suporte de carga do solo, tornando-o mais suscetível à deformação pelo tráfego, o que explica, em grande parte, a curta duração dos efeitos da escarificação (Debiasi et al., 2008; Ortigara et al., 2015). Assim, elevados valores de TIE nem sempre indicam adequada fertilidade estrutural, demonstrando a importância dessa variável ser determinada em conjunto com métodos visuais de avaliação da estrutura, como o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (Ralisch et al., 2017).

No recorte da realidade dos sistemas de produção reproduzidos pelas áreas avaliadas, fica evidente que a degradação da estrutura do solo é um dos principais problemas relacionados ao manejo do solo nas regiões oeste e noroeste do Paraná. Essa condição diminui o crescimento radicular, reduz a eficiência de uso dos fertilizantes e limita a disponibilidade de água e oxigênio às raízes, o que se reflete negativamente sobre a produtividade das culturas, especialmente em anos secos e, ou com excesso de chuvas (Torres; Saraiva, 1999; Bertollo et al., 2021). A degradação estrutural também favorece as perdas de água e de solo por erosão (Richart et al., 2005), com impactos negativos sobre o ambiente e a produtividade (Gaertner et al., 2003; Didoné et al., 2015). O predomínio de modelos de produção pouco diversificados, com baixa adição de biomassa da parte aérea e de raízes, em alguns casos associados a operações de preparo do solo sem critério técnico, são as principais razões que explicam a baixa fertilidade física nestas regiões. O tráfego de máquinas pesadas, muitas vezes em condições de umidade excessiva do solo, é outro fator importante que justifica a degradação da estrutura nas áreas estudadas.

A união entre as partículas de argila, processo conhecido como “floculação”, é base para a formação dos microagregados e, conseqüentemente, de uma estrutura de solo favorável ao crescimento das raízes das plantas (Dexter, 1988). A argila não floculada (dispersa) preenche os espaços entre as partículas minerais maiores (silte e areia) e os agregados, diminuindo a porosidade e aumentando a densidade do solo. Na superfície do solo, o aumento na dispersão das argilas potencializa a formação de crostas superficiais, o que reduz a capacidade de infiltração, a condutividade hidráulica e, conseqüentemente, favorece a erosão (Reichert et al., 1992; Spera et al., 2008; Igwe; Obalum, 2013). As argilas dispersas em água também podem ser deslocadas no perfil de solo, formando camadas de impedimento físico por adensamento (Spera et al., 2008), bem como são mais facilmente transportadas pela enxurrada durante o processo de erosão (Igwe; Obalum, 2013). Esses processos podem ser mais relevantes nos argissolos derivados do arenito onde o gradiente de argila é mais importante do que nos solos derivados de rochas eruptivas.

## **Estratégias de uso e manejo para Latossolos e Argissolos no Arenito Paranaense**

Nos Latossolos e Argissolos do Arenito Paranaense há dois fatores convergentes que limitam o seu uso na agropecuária: (1) solos com baixa retenção de água e susceptíveis à erosão; (2) altas temperaturas, aumentando o risco de perdas de produtividade das culturas por déficit hídrico. Dessa forma, sistemas agrícolas simplificados, amplamente utilizados no Brasil, como a sucessão soja/milho segunda safra, não são indicados para essa condição. Nesse contexto desafiador, é necessário delinear sistemas de produção que utilizem espécies com alta produção de biomassa aérea e radicular, mantendo elevada a cobertura do solo, boa estrutura do solo e um adequado estoque de carbono, mesmo que transitório. Assim, nesta região que abrange parte do oeste e noroeste do Paraná, um sistema indicado é a integração da soja com pastagens anuais de inverno, ou o uso de coberturas do solo com alta produção de biomassa e lenta taxa de decomposição da palhada, como a braquiária *ruziziensis*, por exemplo. Ainda no âmbito de sistemas integrados, a soja e o milho podem ser alternados com pastagens perenes, mantidas nas áreas por dois ou mais anos (Franchini et al., 2016).

Uma outra alternativa relevante para aumentar a produção de biomassa no outono/inverno e a cobertura do solo com palha na semeadura da soja é o consórcio do milho segunda safra com espécies de braquiária, especialmente a *ruziziensis* (Ceccon et al., 2013; Sapucay et al., 2020; Balbinot Junior et al., 2023). Além de proteger o solo contra a energia cinética do impacto das gotas da chuva, reduzindo assim a intensidade dos processos erosivos (Dechen et al., 2015), a cobertura do solo favorece o crescimento radicular por reduzir as perdas de água por evaporação (Andrade, 2008) e o escoamento superficial (Derpsch et al., 1986), o que aumenta a disponibilidade de água e, assim, diminui a magnitude dos estresses hídrico e mecânico que limitam a elongação das raízes. Debiasi et al. (2022) compilaram dados de 16 experimentos e observaram que, para cada tonelada de palha na superfície do solo, ocorre uma redução de 6% na perda de água por evaporação.

Adicionalmente, a cobertura do solo reduz os picos e as médias das temperaturas máximas do solo (Bragagnolo; Mielniczuk, 1990; Torres et al., 2010), o que também favorece o crescimento das raízes, uma vez que temperaturas elevadas se constituem em outro fator físico que pode limitar a taxa de elongação radicular. Segundo Pushkala e Yagarajarao (1988), o máximo comprimento radicular relativo (CRR) da soja ocorreu em temperaturas de solo próximas a 28 °C e, a partir de 30 °C, houve redução linear nesse parâmetro, de forma que, a cada aumento de 1 °C na temperatura, o CCR diminui 8%. Além de limitar o alongamento radicular, valores extremos de temperaturas do solo prejudicam os processos fisiológicos das raízes, podendo diminuir a absorção de água e nutrientes (Nielsen, 1974).

## **Disponibilidade de fósforo**

O P inorgânico na forma disponível se apresenta como um ânion ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ) e está sujeito a interações com vários componentes do solo. A adsorção específica de fosfato pela troca de ligantes com os grupos OH em óxidos e hidróxidos de Fe e Al e nas bordas de minerais de argila cristalinos influencia fortemente a sua concentração na solução do solo.

Os óxidos de Fe e Al apresentam alta capacidade de adsorção de P (Zhang et al., 2019a, 2019b) devido à formação de ligações covalentes com os átomos de Fe e Al que, nas condições de pH predominantes

nos solos ácidos, têm carga líquida positiva. O ponto de carga zero (pcz) dos óxidos de Fe e Al está bem documentado e varia entre pH 7 e 9 (Schwertmann; Taylor, 1989), enquanto o da caulinita está ao redor do pH 3 (Tschapek et al., 1974). Os óxidos de Fe, hematita e goethita são os mais abundantes, com o último podendo apresentar menor superfície específica ( $21$  a  $70 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) (Cornell; Schwertmann; 1996; Torrent et al., 1990) em relação ao primeiro ( $47 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) (Torrent et al., 1994). Em estudo desenvolvido por Fink et al. (2014) o conteúdo de MOS aumentou na camada  $0,0\text{-}0,1 \text{ m}$  dos solos sob plantio direto e não afetou a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) em comparação aos solos sob sistema de preparo convencional. Por outro lado, a CMAP foi significativamente correlacionada com os teores de óxidos de ferro (principalmente com goethita), e foi reduzida com o aumento da MOS no sistema de plantio direto, no Latossolo e Argissolo avaliados por Fink et al. (2016). Estes resultados indicam que a MOS pode interferir nos processos de adsorção, uma vez que vários compostos orgânicos também se comportam como ânions e poderiam competir pelos sítios de adsorção de P, embora esse seja um processo que não impeça completamente a adsorção, já que o P lentamente substitui os ânions orgânicos nos sítios de adsorção (Afif et al., 1995).

A despeito da alta capacidade de adsorção de P nos solos argilosos derivados de rochas eruptivas, o teor de P em áreas tradicionais de produção de grãos na região da 1ª RCCSVF e do projeto AISA é predominantemente alto (Figura 7). Estes dados também são confirmados por monitoramento recente realizado por Debiasi et al. (2021), incluindo glebas da região norte do Paraná, que demonstrou que a maior parte das áreas avaliadas apresentou teores de P acima do valor crítico, estabelecido como  $9 \text{ mg dm}^{-3}$  (Oliveira Junior et al., 2020). A aplicação contínua do nutriente no sistema de produção de soja e milho segunda safra, predominante na região, e as reduzidas perdas do nutriente por lixiviação têm proporcionado acúmulos significativos do elemento na camada superficial do solo. Este cenário coloca o P como o nutriente mais indicado para redução da aplicação de fertilizantes, principalmente em momentos como o que ocorreu recentemente, com a guerra da Ucrânia, que causou aumento expressivo do preço deste produto.

Além disso, na região oeste do Paraná se concentra boa parte da produção paranaense de aves e suínos. Neste cenário, os resíduos orgânicos, como a cama de aviário e o dejetos líquido de suíno, têm sido utilizados como fonte de nutrientes. As concentrações médias de nutrientes na cama de aviário e no dejetos líquido de suíno são muito variáveis, em função da alimentação, número de lotes, tipo da cama utilizada, da idade dos animais, da forma de armazenamento, entre outros fatores. As doses médias aplicadas dependem da disponibilidade do resíduo e da distância para a sua obtenção. Em média, a quantidade de cama de aviário aplicada nas lavouras tem sido em torno de  $4 \text{ t ha}^{-1}$ . Se for considerada uma composição média de NPK de 3:3:2 (Correa; Miele, 2011) para uma cama destinada à produção de sete lotes, nesta quantidade de resíduos, ter-se-ia aproximadamente  $120 \text{ kg}$  de N(total),  $120 \text{ kg}$  de P( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e  $80 \text{ kg}$  de K( $\text{K}_2\text{O}$ ). Considerando uma produtividade média de soja em torno de  $4 \text{ t ha}^{-1}$ , as quantidades de nutrientes exportados nos grãos seriam aproximadamente  $216 \text{ kg}$  de N,  $19 \text{ kg}$  de P e  $72 \text{ kg}$  de K (Oliveira Junior et al., 2020). Considerando uma eficiência de aproveitamento de 100% para N e K e de 50% para P, a cama de aviário atenderia respectivamente 56%, 313% e 111% dos nutrientes requeridos pela cultura. É importante destacar que a soja obtém em torno de 80% do N demandado, por meio da fixação biológica do nitrogênio, mediante simbiose com bactérias fixadoras presentes nos nódulos. De qualquer forma, o uso da cama de aviário tem potencial para suprir as necessidades de K e contribuir para aumentar gradativamente os teores de P no solo.

Por outro lado, o uso de resíduos da produção de suínos tem um impacto diferente no sistema de produção. A produção de dejetos suíno tem superado a capacidade de suporte dos solos da região. Segundo a legislação para o Licenciamento Ambiental de Empreendimentos de Suinocultura no estado do Paraná (Paraná, 2020), a área para aplicação de dejetos de suínos deve ser avaliada de acordo com a classe de risco ambiental e do teor de fósforo disponível no solo. A legislação complementa que o dejetos poderá ser aplicado em áreas cuja classe de P disponível (extrator Mehlich I) na profundidade  $0\text{-}20 \text{ cm}$  seja inferior à classe de interpretação “condição a evitar” apresentada no Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná (Pauletti; Motta, 2019) de acordo com a textura do solo, da seguinte forma:  $> 120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P disponível para teor de argila menor que  $250 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $> 90 \text{ mg dm}^{-3}$  de P disponível para teor de argila entre  $250$  e  $400 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $> 60 \text{ mg dm}^{-3}$  de P disponível para teor de argila maior que  $400 \text{ g kg}^{-1}$ . Para a classe de interpretação de P disponível (extrator Mehlich I) muito alto, de acordo com o Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná (Pauletti; Motta, 2019) somente poderão ser aplicados dejetos em solos nas classes de risco ambiental I, II ou III (sem, baixo e médio risco, respectivamente).

Consideram-se os elementos limitantes para o uso agrícola dos dejetos suínos, o nitrogênio, o fósforo e o potássio, efetuando-se uma adubação baseada no princípio de equilíbrio, ou seja, a taxa de aplicação deverá ser em função do elemento que exigir menor quantidade de dejetos, realizando a complementação quando necessário (Pauletti; Motta, 2019).

Deve-se tomar cuidado com as condições climáticas e evitar aplicar os dejetos quando há previsão de chuva, pois pode haver escoamento superficial e contaminação dos recursos hídricos, principalmente com fósforo e nitrogênio. Dessa forma, são importantes as práticas conservacionistas do solo e o uso de terraços agrícolas.

Por outro lado, o uso de dejetos de animais favorece a agregação do solo (Melo et al., 2019; Bertagnoli et al., 2020), (Balota et al., 2014; Matos et al., 2018; Navroski et al., 2019).

## Considerações finais

O trabalho apresentado é o resultado do esforço para levantar pontos importantes de interação entre o manejo do solo e a pedologia. Chama a atenção o fato que boa parte destas interações não estão sendo consideradas na tomada de decisão dos produtores rurais, na região de abrangência deste trabalho. Permitiu, ainda, a análise de indicadores de qualidade de manejo do solo, nos 15 perfis de solo e 27 glebas agrícolas das regiões noroeste e oeste do Paraná. Possibilitou também identificar os indicadores mais limitantes para o aprimoramento da qualidade de manejo do solo. De acordo com os critérios definidos para cada indicador, aqueles que apresentaram maior número de observações como “muito ruim/ruim” e “regular”, foram: Índice de Qualidade Estrutural do solo (IQEs), cobertura do solo por resíduos vegetais, tempo sem revolvimento do solo, saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). A matéria orgânica foi menos limitante em solos desenvolvidos sobre rochas eruptivas e crítica para solos das rochas sedimentares. Os teores de P e K no solo, em geral, foram os fatores menos limitantes. Sob o ponto de vista das práticas agrícolas, a correção da acidez superficial e subsuperficial mediante calagem e gessagem, o aprimoramento dos modelos de produção buscando maior diversidade de culturas e aporte de palha e raízes, e atentar para o mínimo revolvimento evitando, ao máximo, operações de preparo do solo, permitiria que, no médio e longo prazos, a qualidade do manejo do solo nas áreas avaliadas fosse melhorada. É de extrema importância que sejam adotadas políticas públicas para sensibilização/capacitação de agentes formadores de opinião, para que mudanças importantes na forma de condução dos sistemas produtivos sejam promovidas visando a sustentabilidade e a produtividade agrícola nas regiões oeste e noroeste do Paraná.

## Referências

AFIF, E.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. **Soil Science**, v. 159, n. 3, p. 207-211, 1995.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. D. S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; JUNIOR, A. I. V. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 14-18, 2009.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M.; CURI, N.; OKUNOLA, A.; SOUZA, T. T.; PIRES, B. S. Assessment of vulnerability of Oxisols to compaction in the Cerrado region of Brazil. **Pedosphere**, v. 20, p. 252-260, 2010.

ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174-2181, 2010.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; COELHO, A. E.; SANGOI, L.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soybean-maize off-season double cropping system as affected by maize intercropping with ruzigrass and nitrogen rate. **International Journal of Plant Production**, v. 17, p. 715-728, 2023.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; COELHO, A. E.; SAPUCAY, M. J. L. da C.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L. Performance of soybean grown in succession to black oat and wheat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01654, 2020.

- BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; YOKOYAMA, A. H. Contribution of roots and shoots of *Brachiaria* species to soybean performance in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 8, p. 592-598, 2017.
- BALOTA, E. L.; MACHIESKI, O.; HONDA, C.; YADA, I. F. U.; BARBOSA, G. M. de C.; NAKATANI, A. S.; COYNE, M. S. Response of arbuscular mycorrhizal fungi in different soil tillage systems to long-term swine slurry application. **Land Degradation & Development**, v. 25, 2014.
- BARBOSA, G. M. C.; COSTA, A.; COSTA, M. A. T.; OLIVEIRA, J. F. Increasing the productive potential of an Ultisol using cover crops and organic and mineral fertilization. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, p. 20190495, 2020.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 9-26.
- BERTAGNOLI, B. G. P.; OLIVEIRA, J. F.; BARBOSA, G. M. de C.; COLOZZI FILHO, A. Poultry litter and liquid swine slurry applications stimulate glomalin, extraradicular mycelium production, and aggregation in soils. **Soil and Tillage Research**, v. 202, p. 104657, 2020.
- BERTOLLO, A. M.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; SOLTANGHEISI, A.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; LEVIEN, R.; DEBIASI, H. Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 206, 104820, 2021.
- BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 367-374, 1990.
- CECCON, G.; STAUT, L. A.; SAGRILO, E.; MACHADO, L. A. Z.; NUNES, D. P.; ALVES, V. B. Legumes and forage species sole or intercropped with corn in soybean-corn succession in Midwestern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 204-212, 2013.
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**. Weinheim: VCH Verlag, 1996. 570 p.
- CORREA, J. C.; MIELE, M. A cama de aves e os aspectos agrônômicos, ambientais e econômicos. In: PALHARES, J. C. P.; KUNZ, A. (ed.). **Manejo ambiental na avicultura**,. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. p. 125-152. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 149).
- COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. dos S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 852-863, 2015.
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O. **Diversificação de espécies vegetais como fundamento para a sustentabilidade da cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 60 p. (Embrapa Soja. Documentos, 366).
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; GONÇALVES, S. L. **Manejo da compactação do solo em sistemas de produção de soja sob semeadura direta**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 20 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 63).
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SANTOS, E. L. dos; CECCATTO, S. el K.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O.; NUNES, E. da S.; FURLANETTO, R. H. **Diagnóstico da qualidade do manejo e impacto de modelos de produção aprimorados sobre a fertilidade do solo nas regiões Norte e noroeste do Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2021. 69 p. (Embrapa Soja. Documentos, 441).
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.
- DEBIASI, H.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; FRANCHINI, J. C.; FARIAS, J. R. B.; CONTE, O.; CUNHA, G. R. da; MORAES, M. T. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M. da; EVANGELISTA, B. A.; MARAFON, A. C. **Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 137 p. (Embrapa Soja. Documentos, 447).
- DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. D. F.; MARIA, I. C. D. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, p. 224-233, 2015.
- DERAL. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. Levantamento da Produção Agropecuária. **Produção Agrícola por Município**. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/ProducaoAnual>. Acesso em: 01 nov. 2023.
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 8, p. 253-263, 1986.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 11, p. 199-238, 1988.

- DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, p. 2334-2346, 2015.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v. 81, p. 87-95, 2005.
- DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 159-168, 2016.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 515-524, 1999.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRON, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAYER, C.; TORRENT, J.; BARRON, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, p. 379-387, 2014.
- FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C.; SOUZA, R. A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 2, p. 18-29, 2007.
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FARIAS, J. R. B.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; SANTOS, E. L. dos; SARTORI, A. A. da C.; NUNES, E. da S.; FURLANETTO, R. H.; LEONARDO, H. C. L. **Qualidade do manejo do solo em glebas agrícolas do Paraná cultivadas com soja e enquadramento em níveis de manejo**. Londrina: Embrapa Soja, 2023a. 34 p. (Embrapa Soja. Documentos, 456).
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FARIAS, J. R. B.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; SANTOS, E. L. dos; SARTORI, A. A. da C.; LEONARDO, H. C. L. **Sensoriamento remoto para avaliar o histórico de culturas, cobertura do solo com palha e tempo sem revolvimento do solo em áreas agrícolas, para uso no Zarc Níveis de Manejo**. Londrina: Embrapa Soja, 2023b. 33 p. (Embrapa Soja. Documentos, 454).
- FRANCHINI, J.C.; VELLINI, C. L.; BALBINOT JR., A. A. DEBIASI, H.; WATANABE, R. **Integração Lavoura-Pecuária em solo arenoso e clima quente: duas décadas de experiência**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. (Embrapa Soja. Circular técnica 118).
- GAERTNER, C.; DEDECEK, R. A.; BISCAIA, R. M. Produtividade de trigo e soja em Latossolo Vermelho distrófico sob erosão simulada e causada pela chuva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 1443-1449, 2003.
- GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. da S.; HÖRBE, T. de A. N.; FERREIRA, A. de O.; TABALDI, F. M.; LANZANOVA, M. E. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2115-2126, 2011.
- IGWE, C. A.; OBALUM, S. E. Microaggregate stability of tropical soils and its roles on soil erosion hazard prediction. In: GRUNDAS, S.; STEPNIIEWSKY, A. **Advances in Agrophysical Research**. London: Intechopen, 2013. p. 175-192.
- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; dos REIS, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72-82, 2018.
- MARTIN NETO, L.; TADINI, A. M.; BENTO, L. R.; SANTOS, L. V. dos; MILORI, D. M. B. P. Estrutura e natureza química da matéria orgânica do solo. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. de (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 145-184.
- MATOS, M. A. ; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S. ; BARBOSA, G. M. de C. ; GOES, K. C. G. P. de; LOVATO, G. M. ; NOGUEIRA, M. A. Chemical and microbiological attributes of soil under different management with application of swine wastewater. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 286-295, 2018.
- MELO, T. R. de; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. de C.; SILVA NETO, E. C. da; ANDRELLO, A. C.; TAVARES FILHO, J. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 186-193, 2019.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. In: SEVERIANO, E. da C.; MORAIS, M. F. de; PAULA, A. M. de (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. v. 10, p. 399-462.
- MORAES, M. T. de; BENGOUGH, A. G.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant and Soil**, v. 428, p. 1-26, 2018.

- NAVROSKI, D.; BARBOSA, G. M. de C.; COLOZZI FILHO, A.; MOREIRA, A. Soil enzymatic activity and chemical attributes after continuous and interrupted application of pig slurry. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, p. e5619, 2019.
- NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 237-247, 2008.
- NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1723-1734, 2008.
- NIELSEN, K. F. Roots and root temperature. In: CARLSON, E. W. (ed.). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 293-335.
- NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H. RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2019. 210 p.
- NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 531-539, 2014.
- OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 17).
- OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 3. ed. Piracicaba, FEALQ, 2008. 574 p.
- ORTIGARA, C., MORAES, M. T. D., DEBIASI, H., SILVA, V. R. D., FRANCHINI, J. C.; LUZ, F. B. D. Modeling of soil load-bearing capacity as a function of soil mechanical resistance to penetration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1036-1047, 2015.
- PARANÁ. Resolução Sedest nº 015/2020, de 06 de março de 2020. Estabelece condições e critérios e adota outras providências, para o licenciamento ambiental de empreendimentos de suinocultura no estado do Paraná. **Diário Oficial Executivo**, Curitiba, 2020.
- PAULETTI, V.; MOTTA, C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 289 p.
- PUSHKALA, S.; YAGARAJARAO, Y. Influence of different soil temperatures on water use, growth, and internal water status of soybean. **Plant and Soil**, v. 109, p. 288-290, 1988.
- RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).
- REICHERT, J. M.; CABEDA, M. S. V.; VEIGA, M. da. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 289-298, 1992.
- RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos. **Informe Agropecuário**, v. 128, p. 3-18, 1985.
- RICHART, A., TAVARES FILHO, J., BRITO, O. R., LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-343, 2005.
- SANTOS, J. C. B.; SOUZA JUNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 683-695, 2012.
- SAPUCAY, M. J. L. da C.; COELHO, A. E.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L.; SANGOI, L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; ZUCARELI, C. Nitrogen rates on the agronomic performance of second-crop corn single and intercropped with ruzigrass or showy rattlebox. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, e65525, 2020. 10 p.
- SCHWERTMANN U.; TAYLOR R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.
- SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for c-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002.
- SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Correção e acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 81-96.
- SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P. dos; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2613-2620, 2008.

- TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. de C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAUJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. A. M. da; LIMA, E. de P.; BUENO FILHO, J. S. de S.; MONTEIRO, J. E. B. de A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 272).
- TORRENT, J.; BARRÓN, V.; SCHWERTMANN, U. Phosphate adsorption and desorption by goethites differing in crystal morphology. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, p. 1007-1012, 1990.
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal of Soil Science**, v. 45, p. 45-51, 1994.
- TORRES, E.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SARAIVA, O. F.; ALMEIDA, A. M. R. Manejo do solo na prevenção de doenças radiculares. In: ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. (ed.). **Soja: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. p. 207-279.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 23).
- TSCHAPEK, M.; TCHEICHVILI, L.; WASOWSKI, C. The point of zero charge (pzc) of kaolinite and SiO<sub>2</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixtures. **Clay Minerals**, v. 10, n. 4, p. 219-229, 1974.
- ZHANG, H.; ELSKENS, M.; CHEN, G.; CHOU, L. Phosphate adsorption on hydrous ferric oxide (HFO) at different salinities and pHs. **Chemosphere**, v. 225, p.352-359, 2019a.
- ZHANG, Z.; YAN, L.; YU, H.; YAN, T.; LI, X. Adsorption of phosphate from aqueous solution by vegetable biochar/layered double oxides: Fast removal and mechanistic studies. **Bioresource Technology**, v. 284, p. 65-71, 2019b.