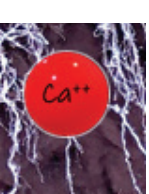
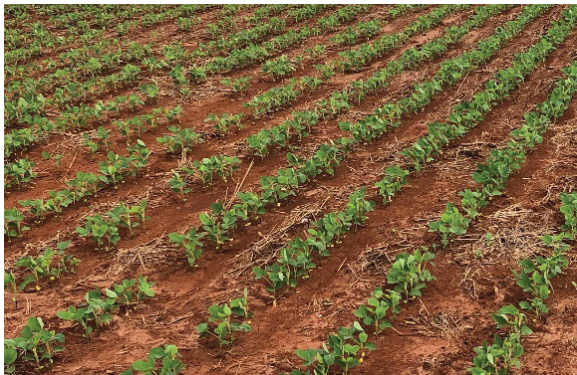
DOCUMENTOS

456

ISSN 2176-2937
Novembro/2023

Qualidade do manejo do solo em glebas agrícolas do Paraná cultivadas com soja e enquadramento em níveis de manejo





Embrapa

ISSN 2176-2937
Novembro/2023

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura e Pecuária

DOCUMENTOS 456

Qualidade do manejo do solo em glebas agrícolas do Paraná cultivadas com soja e enquadramento em níveis de manejo

Júlio Cezar Franchini
Henrique Debiasi
Alvadi Antonio Balbinot Junior
José Renato Bouças Farias
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro
Esmael Lopes dos Santos
Anderson Antônio da Conceição Sartori
Emerson da Silva Nunes
Rafael Herrig Furlanetto
Rodrigo Berger da Silva
Vanei Tonini
Fabricio Bueno Corrêa
Hudson Carlos Lissoni Leonardo

Embrapa Soja
Londrina, PR
2023

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Soja
Rodovia Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral. Caixa Postal 4006
CEP 86085-981 , Distrito de Warta, Londrina, PR
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Soja

Presidente
Adeney de Freitas Bueno

Secretária-Executiva
Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Membros
Claudine Dinali Santos Seixas, Edson Hirose, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, José de Barros França Neto, Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Marco Antonio Nogueira, Mônica Juliani Zavaglia Pereira e Norman Neumaier

Supervisão editorial
Vanessa Fuzinatto Dall´Agnol

Bibliotecária
Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Marisa Yuri Horikawa

Foto da capa:
Júlio Cezar Franchini

1ª edição
PDF digitalizado (2023)

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)
Nome da unidade catalogadora

Qualidade do manejo do solo em glebas agrícolas do Paraná cultivadas com soja e enquadramento em níveis de manejo / Júlio Cezar Franchini ... [et al.]. – Londrina : Embrapa Soja, 2023.
34 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 456).

1. Manejo do solo. 2. Soja. I. Franchini, Júlio Cezar. II. Debiasi, Henrique. III. Balbinot Junior, Alvadi Antonio. IV. Farias, José Renato Bouças. V. Monteiro, José Eduardo Boffino de Almeida. VI. Santos, Esmael Lopes dos. VII. Sartori, Anderson Antônio da Conceição. VIII. Nunes, Emerson da Silva. IX. Furlanetto, Rafael Herrig. X. Silva, Rodrigo Berger da. XI. Tonini, Vanei. XII. Corrêa, Fabricio Bueno. XIII. Leonardo, Hudson Carlos Lissoni. XIV. Série.

CDD 633.34 (21. ed.)

Valéria de Fátima Cardoso - CRB 9/1188

© Embrapa, 2023

Autores

Júlio Cezar Franchini
Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Henrique Debiasi
Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Alvadi Antonio Balbinot Junior
Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

José Renato Bouças Farias
Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro
Engenheiro-agrônomo, doutor em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

Esmael Lopes dos Santos
Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz (FAG), Cascavel, PR.

Anderson Antônio da Conceição Sartori
Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, Bolsista de Inovação Embrapa Soja/Itaipu/FAPED, Londrina, PR.

Emerson da Silva Nunes
Engenheiro-agrônomo da Cocamar, Maringá, PR

Rafael Herrig Furlanetto
Engenheiro-agrônomo da Cocamar, Maringá, PR

Rodrigo Berger da Silva
Engenheiro-agrônomo do Departamento de Assistência Técnica, Coopavel Cooperativa Agroindustrial, Cascavel, PR

Vanei Tonini
Engenheiro-agrônomo da Superintendência Agrícola, Cooperativa Agroindustrial Consolata - Copacol, Cafelândia, PR

Fabricio Bueno Corrêa
Engenheiro-agrônomo, coordenador do Departamento de Inovações Tecnológicas Agropecuárias, Coamo Agroindustrial Cooperativa, Campo Mourão, PR

Hudson Carlos Lissoni Leonardo
Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Engenheiro Sênior Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, PR

Apresentação

Em função do extraordinário avanço tecnológico, associado ao empreendedorismo dos produtores rurais, nas últimas duas décadas o Brasil se consolidou como um dos principais produtores e exportadores de alimentos, fibras e bioenergia. Em 2022, as exportações do agro brasileiro somaram US$ 159 bilhões, ou 47,6% do total exportado. A manutenção do protagonismo brasileiro no cenário do agronegócio mundial passa pelo desenvolvimento e adoção de tecnologias que aumentem a produtividade e a eficiência de uso dos insumos e dos recursos ambientais. Nesse sentido, o aprimoramento do manejo do solo em sistema plantio direto (SPD), considerando as particularidades edafoclimáticas presentes no país, foi e será fundamental para o avanço da competitividade dos principais produtos do agronegócio brasileiro.

A proposta de qualificar o manejo do solo em SPD prevê o enquadramento das áreas em quatro níveis de manejo (NM), sendo o nível um o menos adequado e o quatro o que permite maior sustentabilidade ao sistema de produção. Esse diagnóstico pode ser utilizado para várias finalidades como, por exemplo, gerar distintos graus de riscos para cada NM, junto ao Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), uma vez que o manejo mais adequado do solo se reflete em aumento da infiltração e retenção de água no solo, além de maximizar o crescimento das raízes no perfil do solo, reduzindo o risco de perdas de produtividade face a eventual déficit hídrico.

Para a utilização dos NM em larga escala, é necessário validar os critérios utilizados para cada indicador. Nesse sentido, esta publicação apresenta e discute a caracterização da qualidade de manejo do solo em glebas agrícolas do Paraná em que a soja é cultivada, enquadrando-os nos níveis de manejo propostos. O objetivo do presente estudo é apresentar resultados que contribuam para a evolução da utilização dos NM nas propriedades rurais e para o ZARC NM.

Adeney de Freitas Bueno
Chefe-adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Soja

Sumário

Introdução.....9

Metodologia empregada para avaliação da qualidade do manejo e resultados 11

Enquadramento das glebas em níveis de manejo 18

Considerações finais 30

Agradecimentos.....31

Referências 31

Introdução

Nas últimas cinco décadas, houve aumento significativo da produtividade das principais culturas agrícolas no Brasil, em decorrência principalmente do melhoramento genético e do aprimoramento das técnicas de manejo e controle fitossanitário. Nesse contexto, o aprimoramento do manejo do solo em sistema plantio direto (SPD) foi fundamental para a competitividade das principias culturas graníferas produzidas no país. O SPD, quando implantado e conduzido em conformidade com as suas premissas, constitui-se na principal ferramenta do manejo conservacionista do solo em regiões com clima tropical e subtropical (Derpsch et al., 1986; Schick et al., 2000; Lal, 2007; Babujia et al., 2010; Franchini et al., 2012; Debiasi et al., 2013; Merten et al., 2015; Bayer et al., 2016). As premissas que caracterizam o SPD envolvem a mínima mobilização do solo, restrita à linha de semeadura; a cobertura permanente do solo por culturas ou por seus resíduos; e a diversificação de espécies vegetais, via rotação, sucessão e consorciação de culturas. Estatísticas recentes indicam que o SPD é utilizado em cerca de 33 milhões de hectares no Brasil (Fuentes-Llanillo et al., 2021), o que demonstra a ampla adoção desse sistema de manejo do solo. Todavia, é consenso que a maior parte dessa área não atende de forma integral às premissas do sistema, restringindo-se, em várias situações, apenas à mínima mobilização do solo pela eliminação de operações de preparo primário e secundário do solo. Nesse caso, grande parte dos benefícios do SPD não é alcançada e problemas associados à ocorrência de erosão, degradação da estrutura do solo, elevação das perdas de produtividade em função de estresses climáticos (seca ou excesso de chuvas) e aumento da incidência e dos danos ocasionados por pragas, doenças e plantas daninhas, têm sido frequentemente observados, ameaçando a sustentabilidade dos sistemas de produção de grãos.

Um desafio recorrente é o diagnóstico adequado da qualidade do manejo do solo em glebas agrícolas, considerando conjuntamente atributos químicos, físicos e biológicos, a fim de identificar atributos limitantes que afetam a produtividade das culturas e a conservação do solo e da água. É importante frisar que as metodologias de diagnósticos precisam ser confiáveis e factíveis de serem utilizadas em larga escala. Nesse sentido, Debiasi et al. (2022) propuseram a utilização de sete indicadores para definir níveis de manejo do solo (NM), que variam de 1 a 4, em que o NM 1 se refere ao menos adequado e o NM 4 ao mais adequado (Tabela 1). Os indicadores são: 1) tempo sem revolvimento do solo (anos); 2) porcentagem de cobertura do solo por resíduos vegetais na semeadura; 3) saturação da CTC por bases (V%) na camada de solo de 0-20 cm; 4) teor de Ca^{2+} na camada 20-40 cm; 5) porcentagem de saturação por Al (m%) na camada 20-40 cm; 6) índice de qualidade estrutural do solo (IQEs); e 7) diversidade de culturas, considerando os últimos três anos agrícolas.

Tabela 1. Critérios e indicadores para enquadramento das áreas de soja e milho nos níveis de manejo (Debiasi et al., 2022).

Indicador	Nível de manejo (NM)			
	NM1	NM2	NM3	NM4
1) Tempo sem preparo do solo em área total (anos)	< 3	3 a 5	6 a 8	> 8
2) Porcentagem de cobertura do solo na semeadura da soja	< 45	45 a 60	61 a 75	> 75
3) V% (0-20 cm)[1] CTC < 7,0 $cmol_c$ dm^{-3} CTC 7,1 a 10,0 $cmol_c$ dm^{-3} CTC > 10,0 $cmol_c$ dm^{-3}	 < 35 < 40 < 50	 35 a 40 40 a 45 50 a 55	 41 a 50 46 a 55 56 a 65	 > 50 > 55 > 65
4) Teor de Ca^{2+} ($cmol_c$ dm^{-3}) (20-40 cm)	< 0,5	0,5 a 0,7	0,8 a 1,0	> 1,0
5) m% (20-40 cm)[2]	> 20	10 a 20	5 a 9	< 5
6) IQEs - DRES[3]	< 2,0	2,0 a 3,0	3,1 a 4,0	>4,0
7) Diversidade de culturas considerando os últimos 3 anos agrícolas	Requisitos dos outros NMs não atendidos ou não informados	- 4 cultivos; e - 2 espécies vegetais; e - 2 famílias botânicas.	- 6 cultivos; e - 2 espécies vegetais; e - 2 famílias botânicas; e - 1 cultivo exclusivo envolvendo plantas de cobertura do solo (solteiro ou consorciado) por mais de 4 meses OU 3 cultivos de consórcio grãos + cobertura ou 3 cultivos de cobertura na janela outonal ou de fim de inverno, com permanência na área por menos de 4 meses.	Sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) envolvendo o cultivo de pastagens por um ano ou mais na mesma área - 6 cultivos; e - 4 espécies vegetais; e - 2 famílias botânicas; e - 3 cultivos envolvendo plantas de cobertura do solo (solteiro ou consorciado com outras plantas de cobertura ou para produção de grãos), com pelo menos 1 cultivo exclusivo por mais de 4 meses.

[1] V% = saturação por bases (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} / CTC pH 7,0); [2] m% = saturação por alumínio (Al^{3+}/CTC efetiva); [3] IQEs = Índice de qualidade estrutural do solo, pelo diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) - Ralisch et al. (2017).

A categorização dos NM pode ser utilizada para várias finalidades. Debiasi et al. (2022) propuseram a utilização dos NM para gerar resultados de Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) específicos para cada NM. Essa abordagem representa um importante avanço na metodologia do ZARC, uma vez que quantifica a redução de risco de déficit hídrico com manejo conservacionista do solo e, por conseguinte, estimula a adoção de boas práticas de manejo pelos produtores rurais. Conforme Sentelhas et al. (2015), aproximadamente 85% da diferença entre a produtividade potencial e a observada deve-se ao não atendimento pleno das necessidades hídricas das plantas. Isso significa que, mesmo em safras consideradas normais do ponto vista climático, a produtividade das culturas de grãos no Paraná tem sido limitada pela ocorrência de déficit hídrico.

Além de limitar a produtividade potencial, a ocorrência de secas tem frequentemente levado a reduções drásticas na produtividade das culturas em relação à média das safras consideradas normais. Franchini et al. (2016) estimaram que a ocorrência de secas ocasionou perdas de 20,8 milhões de toneladas de grãos de soja em 16 safras (1999/2000 a 2014/2015). As regiões Norte e, sobretudo,

Noroeste do Estado, foram as que apresentaram as maiores perdas, com maior variabilidade temporal da produtividade. Isso decorre do predomínio de baixas altitudes, temperaturas médias mais altas, distribuição irregular de chuvas e, no caso específico da região noroeste (Arenito Caiuá), de solos de textura média a arenosa.

A utilização dos sete indicadores para enquadramento em NM necessita de um processo de validação, considerando situações reais de lavouras comerciais. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é apresentar e discutir resultados da avaliação da qualidade do manejo do solo em 62 glebas agrícolas do Paraná e enquadramentos das mesmas nos NM propostos por Debiasi et al. (2022).

Metodologia empregada para avaliação da qualidade do manejo e resultados

As avaliações foram realizadas em 62 glebas agrícolas nas regiões Norte, Noroeste e Oeste do Paraná (Figura 1) nas safras 2019/2020 e 2021/2022, no âmbito dos projetos: “Transferência de tecnologias e difusão de conhecimentos com base em avaliações de impacto regionalizadas para o aprimoramento do manejo do solo em sistemas de produção de grãos no Estado do Paraná”, financiado pela Cocamar Cooperativa Agroindustrial, e “Inovações na abordagem temática para a conservação de solo e água em bacias hidrografias no entorno da Represa de Itaipu”, financiado pela Itaipu Binacional. As glebas avaliadas estão localizadas em regiões com expressivas diferenças de altitude, variando de 267 m (Iporã) a 805 m (Cambira) (Tabela 2). A variação de altitude se reflete em distintos padrões climáticos, sobretudo a temperatura. As glebas foram selecionadas para representar diferentes histórico de manejo do solo, sem, contudo, ter a pretensão de representar em plenitude o universo de manejos de solo nas regiões consideradas na pesquisa.

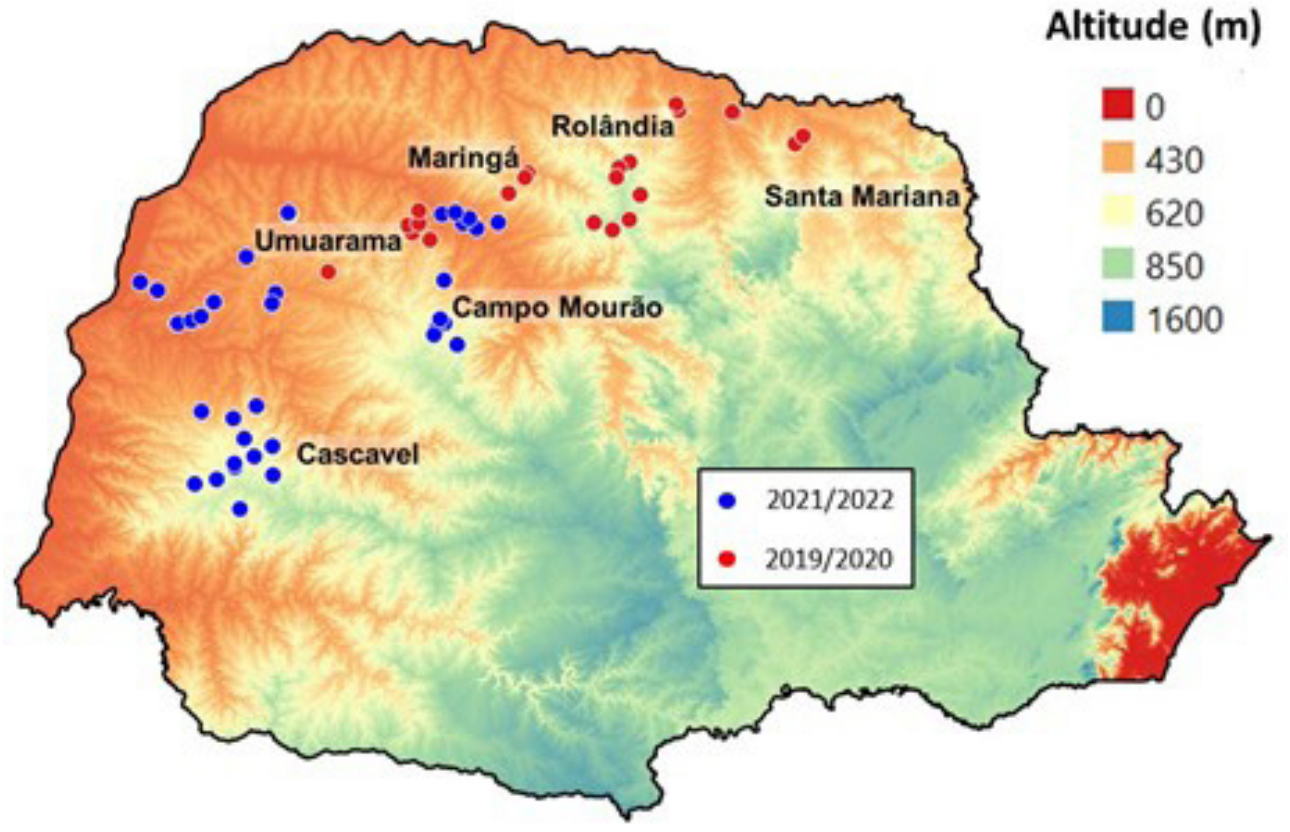


Figura 1. Distribuição espacial das 62 glebas avaliadas em duas safras agrícolas, quanto à qualidade do manejo do solo, sobre mapa que representa a variação de altitude no Paraná. Embrapa Soja, 2023.

Fonte: INPE (2008).

Tabela 2. Município, altitude, origem do solo e modelo de produção adotado nos últimos três anos nas 62 glebas avaliadas quanto à qualidade do manejo do solo. Embrapa Soja, 2023.

Áreas[1]	Município	Altitude (m)	Origem do solo	Modelo de produção
1	Iporã	333	Arenito	Milho/Soja[2][6]
2	Cafezal do Sul	302	Arenito	Pasto degradado/Soja 1º ano[7]
3	Iporã	309	Arenito	Braquiária ruziziensis/Soja[5]
4	Bela Vista do Paraíso	590	Basalto	Milho/Soja
5	Maringá	420	Basalto	Milho/Soja
6	Santa Mariana	376	Basalto	Milho + braquiária ruziziensis[3] [6]/Soja
7	Maringá	523	Basalto	Milho + braquiária ruziziensis/Soja
8	Arapongas	709	Basalto	Milho/Soja
9	Sertaneja	433	Basalto	Milho/Soja
10	Maringá	470	Basalto	Aveia + nabo + centeio/Milho verão (2017/2018) Milho/Soja (2018/2019) Milho/Soja (2019/2020)
11	Cambira	805	Basalto	Aveia/Soja [6]
12	Rolândia	695	Basalto	Milho/Soja (2017/2018) Milheto-Trigo[4]/Soja (2018/2019) Braquiária ruziziensis + nabo/Soja (2019/2020)
13	Cianorte	479	Arenito	Milho/Soja
14	Cianorte	447	Arenito	Braquiária ruziziensis/Soja (2017/2018) Braquiária ruziziensis/Soja (2018/2019) Braquiária ruziziensis + Crotalária ochroleuca/Soja (2019/2020)
15	Rolândia	585	Basalto	Trigo/Soja (2017/2018) Milho/Soja (2018/2019) Braquiária ruziziensis/milho verão (2019/2020)
16	Jussara	365	Basalto	Cana/Soja 1º ano[7]
17	Apucarana	794	Basalto	Trigo/Soja[5]
18	Apucarana	731	Basalto	Trigo/Soja (2017/2018) Trigo/ Soja (2018/2019) Milho/Soja (2019/2020)
19	Rolândia	759	Basalto	Milho + Braquiária ruziziensis/Soja
20	Bela Vista do Paraíso	586	Basalto	Milho + Braquiária ruziziensis/Soja
21	Jussara	330	Arenito	Cana/Soja (2017/2018) Braquiária ruziziensis/Soja (2018/2019) Braquiária ruziziensis/Soja (2019/2020)
22	Santa Mariana	437	Basalto	Milho/Soja
23	Jussara	442	Basalto	Milho/Soja (2017/2018) Milho/Soja (2018/2019) Trigo/Soja (2019/2020)
24	Sertaneja	416	Basalto	Milho/Soja (2017/2018) Trigo/Soja (2018/2019) Soja/Milho (2019/2020)
25	Cruzeiro do Oeste	422	Arenito	Braquiária ruziziensis/Soja[6]
26	Altônia	352	Arenito	Mandioca/Soja 1º ano[7]
27	Altônia	285	Arenito	Pasto degradado/Soja 1º ano
28	Iporã	318	Arenito	Milho/Soja
29	Cafezal do Sul	295	Arenito	Pasto degradado/Soja 1º ano
30	Iporã	312	Arenito	Milho + Braquiária ruziziensis/Soja
31	Iporã	267	Arenito	Milho/Soja
32	Perobal	363	Arenito	Milho/Soja

Continua...

Tabela 2. Continuação

33	Maria Helena	384	Arenito	Pasto em ILP (2019/2020) Pasto em ILP (2020/2021) Pasto em ILP/Soja 1º ano (2021/2022)
34	Maria Helena	355	Arenito	Pasto em ILP (2019/2020) Pasto em ILP/Soja (2020/2021) Braquiária ruziziensis/Soja (2021/2022)
35	Maria Helena	375	Arenito	Braquiária ruziziensis/Soja
36	Maria Helena	340	Arenito	Pasto perene
37	Umuarama	343	Arenito	Milho/Soja
38	Perobal	384	Arenito	Milho/Soja (2019/2020) Milho + Braquiária ruziziensis/Soja (2020/2021) Milho + Braquiária ruziziensis/Soja (2021/2022)
39	Campo Mourão	599	Basalto	Aveia/Soja (2019/2020) Aveia/Soja (2020/2021) Trigo/Milho verão (2021/2022)
40	Campo Mourão	581	Basalto	Trigo/Soja Milho/Soja Trigo/Soja
41	Campo Mourão	661	Basalto	Trigo/Soja
42	Campo Mourão	644	Basalto	Aveia preta/Milho verão (2019/2020) Trigo/Soja (2020/2021) Trigo/Soja (2021/2022)
43	Luiziana	702	Basalto	Aveia/Soja Trigo/Soja Milho/Soja
44	Peabiru	479	Basalto	Milho/Soja
45	Floresta	380	Basalto	Milho/Soja
46	Ivatuba	361	Basalto	Milho/Soja
47	Doutor Camargo	346	Basalto	Milho/Soja
48	Doutor Camargo	333	Basalto	Milho/Soja
49	São Jorge do Ivaí	333	Basalto	Milho/Soja
50	São Jorge do Ivaí	343	Basalto	Milho + Braquiária ruziziensis/Soja
51	Cascavel	702	Basalto	Milho/Soja
52	Cascavel	647	Basalto	Trigo/Soja
53	Santa Tereza do Oeste	546	Basalto	Milho/Soja
54	Cascavel	627	Basalto	Milho/Soja
55	Cascavel	654	Basalto	Milho/Soja
56	Corbélia	714	Basalto	Trigo/Soja
57	Cascavel	685	Basalto	Milho/Soja
58	Cafelândia	615	Basalto	Milho-trigo[5]/soja (2019/2020) Milho+ braquiária ruziziensis/Soja (2020/2021) Milho + braquiária ruziziensis/Soja (2021/2022)
59	Assis Chateaubriand	475	Basalto	Milho + Braquiária ruziziensis/Soja
60	Assis Chateaubriand	567	Basalto	Milho/Soja
61	Jesuítas	480	Basalto	Milho/Soja
62	Corbélia	630	Basalto	Trigo/Milho verão (2019/2020) Trigo/Soja (2020/2021) Milho + Braquiária/Soja (2021/2022)

[1] Áreas de 1 a 25 avaliadas na safra 2019/2020 e áreas de 26 a 62 avaliadas na safra 2021/2022; [2] O símbolo "/" separa culturas semeadas no outono-inverno (ou 2ª safra) das implantadas na primavera-verão em um mesmo ano agrícola; [3] O símbolo "+" indica consorciação entre as espécies citadas; [4] Milheto cultivado na janela outonal, entre a colheita da soja e a semeadura do trigo; [4] Milheto cultivado na janela outonal, entre a colheita da soja e a semeadura do trigo; [5] Trigo 3ª safra, cultivado no período entre a colheita do milho 2ª safra e a semeadura da soja; [6] Sucessões de culturas, com a sequência anual repetida nas três safras; [7] Áreas ocupadas por pasto degradado, cana-de-açúcar ou mandioca até a primavera de 2021, quando foram então cultivadas pela 1ª vez com soja.

A diversidade de espécies utilizadas nos últimos três anos e o tempo sem revolvimento do solo foram obtidos por meio de questionário aplicado aos proprietários das glebas. Recentemente, Franchini et al. (2023) propuseram que essas informações podem ser coletadas de forma independente por sensoriamento remoto. Nas áreas avaliadas, houve utilização de vários modelos de produção, com diferentes graus de diversificação de espécies cultivadas (Tabela 2). Cerca de 39% das glebas haviam utilizado a sucessão milho 2ª safra/soja nos últimos três anos. No entanto, foram considerados outros modelos de produção, inclusive integração lavoura-pecuária e soja após a cana, mandioca e pastagem degradada. Isso ilustra a diversidade de modelos de produção em que a soja está inserida nas regiões consideradas.

O tempo sem revolvimento do solo variou de 1 a 13 anos (Tabela 3). Observou-se que 47% das glebas apresentaram preparo do solo nos últimos 5 anos, demonstrando que a mobilização do solo, visando a incorporação de corretivos e fertilizantes, controle de plantas daninhas resistentes a herbicidas e descompactação é algo frequente. Além disso, é interessante notar a ausência de glebas sem mobilização em longo prazo - período superior a 20 anos. Isso é algo preocupante, pois há resultados de pesquisas que indicam que a longevidade do SPD é relevante para o aprimoramento da qualidade do solo e para o aumento da produtividade e da estabilidade da produção face à ocorrência de estresses climáticos (Franchini et al., 2012; Debiasi et al., 2013).

Tabela 3. Tempo sem revolvimento do solo, cobertura do solo na semeadura da cultura, Índice de Qualidade da Estrutura do Solo (IQEs), CTC a pH 7,0 na camada de 0-20 cm, saturação da CTC por bases (V), teor de cálcio na camada de 20-40 cm, saturação da CTC por alumínio (m), teores de areia, silte e argila na camada de 0-20 cm, água disponível (AD) e classes de AD nas 62 glebas avaliadas quanto à qualidade do manejo do solo. Embrapa Soja, 2023.

Área	Tempo (anos)	Cobertura (%)	IQEs	CTC pH 7,0 (cmol/dm³)	V %	Ca^{2+} cmol/dm³	m	Areia	Silte %	Argila	AD(1) mm/cm	Classes
1	3	24	1,68	5,0	51	1,11	5	80	4	17	0,61	AD3
2	6	62	3,87	4,6	29	0,72	23	85	2	13	0,50	AD2
3	13	100	4,08	3,9	43	0,55	11	85	3	12	0,48	AD2
4	1	63	2,03	11,9	67	4,71	0	21	16	64	1,00	AD4
5	3	72	2,21	10,7	64	3,71	0	12	10	79	0,83	AD4
6	12	86	4,88	11,2	51	4,05	0	16	14	70	0,94	AD4
7	9	84	3,80	12,0	50	3,93	1	11	17	72	0,92	AD4
8	2	82	3,32	10,7	36	2,36	2	10	10	80	0,81	AD4
9	3	73	2,95	13,7	68	7,30	0	9	17	74	0,90	AD4
10	9	75	5,05	12,0	56	5,24	0	16	15	69	0,95	AD4
11	12	63	4,13	12,1	59	4,40	0	14	11	75	0,88	AD4
12	12	88	4,00	11,3	50	2,00	24	9	8	83	0,75	AD3
13	3	53	1,42	6,0	50	1,73	4	72	4	24	0,77	AD3
14	8	94	3,19	4,8	55	1,19	1	81	1	18	0,60	AD2
15	8	87	4,48	11,7	64	5,44	0	13	15	73	0,91	AD4
16	1	55	1,67	9,6	45	2,76	2	22	10	68	0,97	AD4
17	5	62	3,13	13,7	60	4,24	4	13	15	72	0,92	AD4
18	2	63	2,30	14,2	57	6,38	0	8	16	76	0,88	AD4
19	9	90	3,76	11,4	52	2,57	10	14	10	76	0,86	AD4
20	13	81	3,93	10,7	57	3,55	0	24	12	64	1,00	AD4
21	2	72	3,00	5,7	39	0,76	38	73	4	23	0,75	AD3
22	3	59	2,61	14,3	53	5,53	0	9	20	71	0,96	AD4
23	4	45	2,48	10,7	53	3,23	2	18	11	71	0,93	AD4
24	9	75	2,91	11,6	39	3,77	0	14	12	74	0,89	AD4

Continua...

Tabela 3. Continuação

25	2	54	3,97	5,8	42	0,84	20	81	2	17	0,59	AD2
26	3	51	1,63	5,0	48	0,88	13	87	3	10	0,44	AD1
27	7	80	3,40	4,7	26	0,73	40	84	4	12	0,51	AD2
28	3	69	1,48	5,2	53	1,27	9	81	3	16	0,57	AD2
29	10	55	1,15	5,0	36	0,92	15	85	2	13	0,48	AD2
30	12	88	4,48	4,0	47	0,82	6	89	1	10	0,41	AD1
31	2	69	1,88	3,9	29	0,72	11	92	3	5	0,34	AD1
32	6	44	1,38	5,4	45	0,83	33	82	2	16	0,57	AD2
33	12	89	4,52	4,8	46	1,29	3	85	1	14	0,51	AD2
34	12	88	3,80	4,5	38	1,04	11	88	1	11	0,43	AD1
35	12	67	2,35	5,2	54	1,59	0	86	2	13	0,48	AD2
36	12	100	4,83	5,0	56	1,59	0	90	1	9	0,39	AD1
37	3	74	2,90	4,8	53	1,31	1	89	2	10	0,41	AD1
38	4	58	1,77	4,2	47	0,98	1	90	1	9	0,39	AD1
39	12	86	4,17	10,2	46	2,64	1	17	8	75	0,89	AD4
40	3	87	4,39	12,2	54	3,48	1	15	13	72	0,92	AD4
41	7	90	3,43	11,7	59	3,60	0	16	10	73	0,91	AD4
42	12	88	2,95	12,6	42	2,33	13	11	11	78	0,83	AD4
43	12	74	2,54	13,9	54	3,09	6	7	13	81	0,80	AD4
44	4	66	3,32	12,0	53	2,46	10	13	11	76	0,86	AD4
45	3	66	2,23	11,2	61	3,85	0	8	12	80	0,80	AD4
46	12	60	3,34	15,0	60	6,73	0	11	20	69	0,98	AD4
47	2	58	2,36	12,6	68	5,42	0	12	12	76	0,86	AD4
48	12	88	3,60	12,0	68	4,96	0	14	13	73	0,90	AD4
49	3	59	2,17	10,5	43	3,07	3	12	15	73	0,91	AD4
50	12	55	3,08	7,9	39	1,63	29	30	9	61	1,04	AD4
51	12	64	3,53	12,3	57	1,85	25	13	12	75	0,87	AD4
52	3	79	3,29	12,2	58	2,54	19	9	12	78	0,83	AD4
53	3	63	2,53	14,1	56	4,19	9	6	12	82	0,77	AD3
54	12	50	2,88	13,2	62	3,96	0	15	19	66	0,99	AD4
55	12	68	3,23	12,4	56	2,97	7	14	15	71	0,93	AD4
56	10	87	2,86	12,4	39	2,61	18	18	11	70	0,94	AD4
57	4	78	1,34	13,4	56	3,20	14	1	13	86	0,71	AD3
58	5	69	4,08	14,5	59	3,76	8	7	12	82	0,77	AD3
59	12	79	4,47	12,5	51	4,01	1	7	12	80	0,80	AD4
60	3	69	2,16	12,4	58	3,91	1	7	17	77	0,87	AD4
61	3	72	2,48	12,5	51	4,19	3	11	11	78	0,83	AD4
62	12	82	3,98	12,9	53	3,59	3	9	13	78	0,83	AD4

(1) AD: água disponível calculado de acordo com Teixeira et al. (2021).

As avaliações e amostragens para quantificação dos demais indicadores foram realizadas durante os meses de outubro e novembro de 2019 e 2021, quando a soja se encontrava no início do subperíodo vegetativo (estádios V3 a V5). Os pontos amostrais foram georreferenciados e sua distribuição dentro das glebas realizada de modo que todos ficassem aproximadamente na mesma cota no terço médio da encosta, e equidistantes ao longo de toda a largura da gleba, excluindo-se regiões não representativas da área, como bordaduras, terraços e locais de manobras e/ou concentração de tráfego de máquinas agrícolas (Figura 2). Os pontos foram alocados obedecendo a uma distância mínima de 30 m das bordas da área, e de 15 m entre si. A porcentagem de cobertura do solo e o

IQEs foram avaliados em oito pontos por gleba. Nos mesmos pontos, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm por meio de trado holandês, cada uma composta por cinco subamostras, para as análises químicas e granulométricas (teores de areia, silte e argila total).

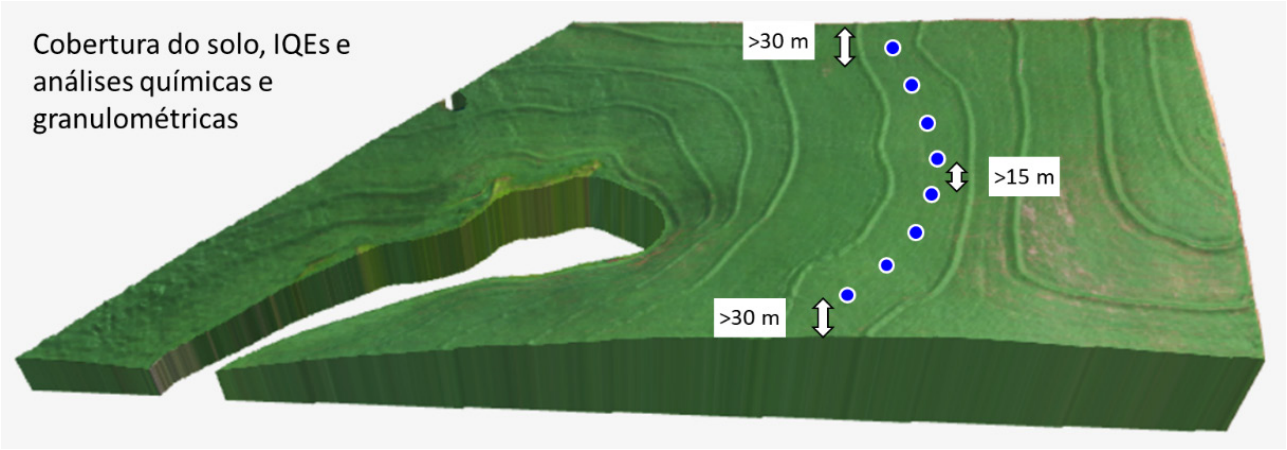


Figura 2. Alocação dos pontos de avaliação e amostragem de solo em uma das glebas avaliadas na safra 2019/2020.

A porcentagem de cobertura do solo por resíduos vegetais na semeadura da soja foi estimada pelo método do transecto (Richards et al., 1984; Morrison et al., 1993). Resumidamente, esse método envolve a utilização de corda com 15 metros, marcada com abraçadeira de nylon (tipo “enforca gato”) a cada 15 cm, totalizando 100 pontos marcados (Figura 3). A corda é então esticada em um ângulo aproximado de 45º em relação às linhas de semeadura em cada um dos oito pontos de avaliação (Figura 4). O número de marcações na corda sobrepondo pontos cobertos com palha corresponde diretamente na porcentagem de solo coberto.

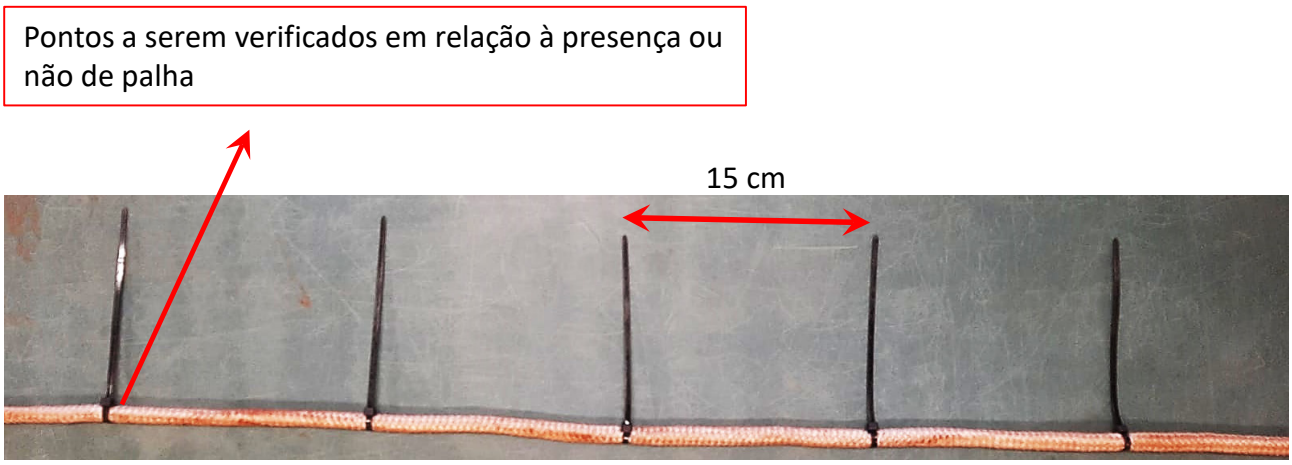


Figura 3. Corda marcada com abraçadeiras de nylon a cada 15 cm, utilizada no método do transecto para avaliação da porcentagem de cobertura do solo.

Figura 4. Imagem demonstrando a disposição da corda marcada em relação às linhas de semeadura, para determinação da porcentagem de cobertura do solo pelo método do transecto.

A menor cobertura do solo com palha foi observada na gleba 1, com apenas 24% (Tabela 3), a qual é manejada com o modelo de sucessão milho segunda safra/soja e se encontra no município de Iporã, região que apresenta altas temperaturas. Ou seja, possivelmente, nessa gleba, o milho produziu baixa quantidade de biomassa e o clima quente contribuiu para a rápida decomposição da palha. Em 47% das glebas, contatou-se que a cobertura foi inferior a 70%, demonstrando a carência de cobertura do solo, uma das premissas do SPD. Por outro lado, em apenas cinco glebas a cobertura do solo com palha foi ≥90%, ideal para a semeadura da soja em SPD. Nestas áreas, a semeadura da soja foi precedida por cobertura do solo com braquiária ruziziensis solteira (gleba 3), braquiária consorciada com crotalária (gleba 14), milho segunda safra consorciado com braquiária (gleba 19), pastagem perene (gleba 36) e trigo (gleba 41) (Tabela 3). Ou seja, em nenhuma área de soja precedida por milho segunda safra solteiro – modelo preponderante nas regiões avaliadas – houve cobertura do solo superior a 90%. A baixa cobertura do solo proporcionada pelo milho segunda safra é associada às características dos seus resíduos culturais, em que grande parte da massa é concentrada em colmos densos com baixa capacidade de cobrir efetivamente o solo (Debiasi et al., 2022). Além disso, a existência de um intervalo longo entre a colheita do milho segunda safra e a semeadura da soja, que em alguns casos se aproxima dos 90 dias, proporciona redução da cobertura em função da decomposição da palhada, processo que é acelerado em regiões com invernos mais quentes.

O Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQEs) foi avaliado por meio do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (Ralisch et al., 2017). O IQEs pode assumir valores entre 1 e 6, proporcionais à qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas. Constatou-se grande amplitude de IQEs nas glebas avaliadas, variando de 1,15 (área 29, com alta degradação da estrutura física) a 5,05 (área 10, com alta qualidade estrutural). Em 29 das 62 glebas avaliadas (47%) o IQEs foi ≤ 2,9 (estrutura física ruim ou muito ruim). Nessas áreas, indica-se realizar um diagnóstico mais apurado da área, incluindo as condições químicas e físicas no perfil; revisar as práticas conservacionistas do

solo; e aprimorar o modelo de produção utilizado, aumentando a diversidade de espécies vegetais e priorizando culturas com alta capacidade de aporte de biomassa aérea e de raízes. No processo de recuperação da estrutura do solo, é indicado o uso de plantas recuperadoras, em relação ao emprego de práticas mecânicas, bem como evitar operações de preparo de solo (Ralisch et al., 2017). Por outro lado, apenas 13 glebas (21%) apresentaram valores de IQEs ≥ 4,0, indicativos de qualidade estrutural boa ou muito boa (Tabela 3), demonstrando que fatores relacionados à física do solo representam grande limitação à produtividade e estabilidade da produção na região estudada.

Os indicadores saturação da CTC por bases (V%) e por alumínio (m%) e teores de cálcio trocável foram determinados por meio de análise química do solo. O V% na camada de 0-20 cm variou de 26 a 68, indicando a ampla variação entre as glebas quanto a esse indicador (Tabela 3). Em 34% das glebas avaliadas, o V% foi inferior a 50, o que indica a necessidade de aplicação de corretivos de acidez. O teor de Ca na camada de 20-40 cm variou de 0,55 a 7,30 $cmol_c\ dm^{-3}$. Em 69% das glebas foi detectado alumínio na camada de 20-40 cm, embora a maioria com m% inferior a 20 (Tabela 3).

Embora a Água Disponível (AD) não seja um indicador de qualidade de manejo do solo com vistas ao enquadramento em NM, a mesma foi estimada por ser uma das principais variáveis de solo que determina o risco climático na atual versão do ZARC. A AD foi determinada em função da composição textural, seguindo metodologia proposta por Teixeira et al. (2021). A AD variou de 0,34 mm/cm (gleba 32, com 92, 3 e 5% de areia, silte e argila, respectivamente) a 1,04 mm/cm (gleba 50, com 30, 9 e 61% de areia, silte e argila, respectivamente) (Tabela 3). A grande variação de AD decorre da presença de áreas em solos originados do basalto, que apresentam baixa porcentagem de areia, e em solos originados do arenito, que apresentam alta porcentagem de areia. Nesse sentido, as classes de AD variaram de 1 a 4.

Enquadramento das glebas em níveis de manejo

Em relação à diversificação de espécies cultivadas nos últimos três anos, 38 glebas foram enquadradas no NM 2, indicando baixa diversificação e 24 glebas nos NM 3 ou 4, com uso de modelos de produção com maior diversidade biológica e aporte de palha e raízes (Figura 5). Nenhuma área foi enquadrada no NM 1 para esse indicador. Desse modo, o aprimoramento dos modelos de produção, com o aumento da diversidade de espécies vegetais e do aporte de palha e raízes, é necessário em 62% das glebas avaliadas para mudança de NM 2 para NM 3. Em solos originados do basalto, 27 glebas foram enquadradas no NM 2 e 15 no NM 3, sem nenhum caso no NM 4 (Figura 6). Em solos originados do arenito, 11 glebas foram enquadradas no NM 2, 6 no NM 3 e apenas 3 no NM 4 (Figura 7). O NM 4 foi representado por fases de um sistema de ILP. Ressalta-se que esses números não refletem a proporção real de áreas enquadradas nos diferentes NM na região de estudo, uma vez que a seleção das glebas não foi aleatória e sim sistemática, de forma a englobar modelos de produção com diferentes níveis de diversificação de culturas e potenciais de aporte de biomassa vegetal. Neste contexto, a dificuldade de encontrar áreas com modelos de produção mais diversificados mesmo em um processo de seleção não aleatório denota a baixa adoção dessa prática pelos produtores. Essa afirmação vem ao encontro de estatísticas do Departamento de Economia Rural (Paraná, 2023) evidenciando que, na região abrangida pelo estudo durante a safra 2021/2022, 98% da área cultivada com grãos no verão é ocupada por soja e, no outono-inverno, 90% da área de soja é utilizada para a produção de milho segunda safra (75%) ou trigo (15%). Os resultados em relação à diversificação de culturas podem estar indicando também que os critérios utilizados para enquadramento nos NM 3 e, sobretudo, NM 4, sejam muito restritivos apontando para a necessidade de revisão contínua dos valores e características de referência à medida que a metodologia vai sendo aplicada em escala de campo.

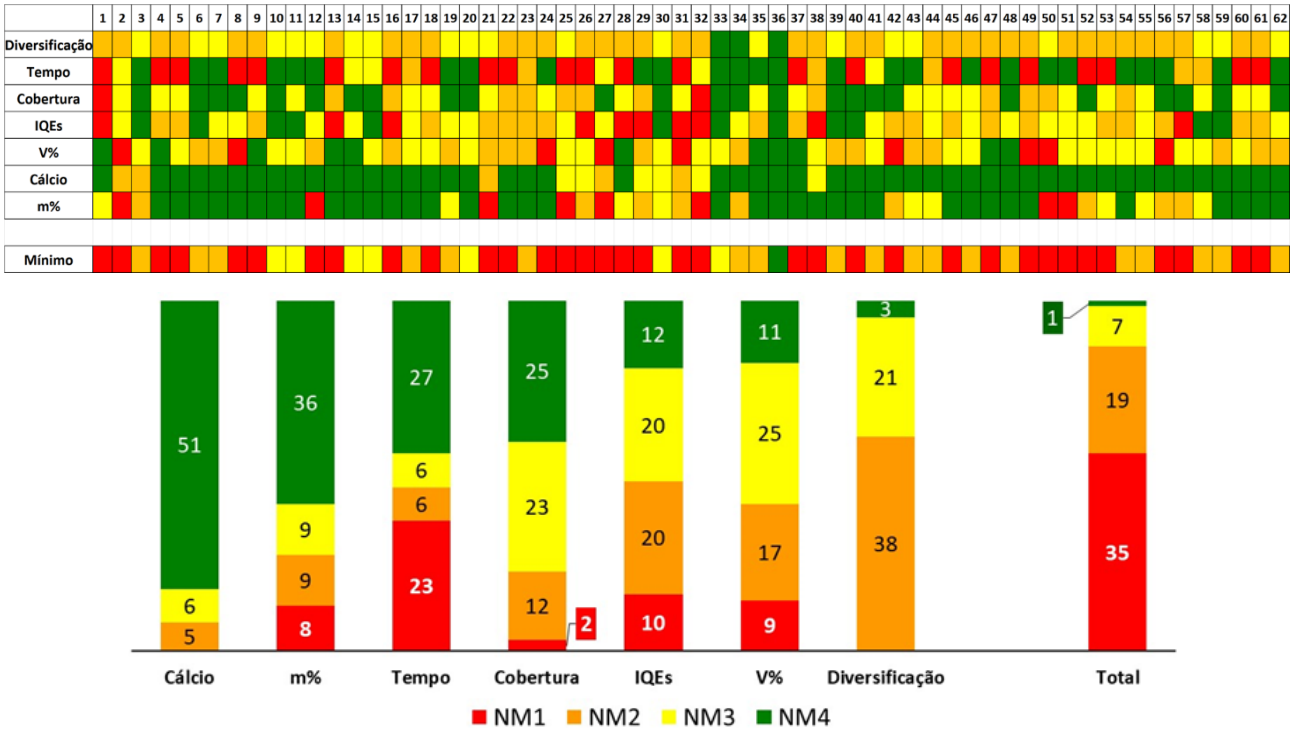


Figura 5. Enquadramento das glebas nos níveis de manejo de acordo com os indicadores e critérios. 62 lavouras avaliadas nas safras 2019/2020 e 2021/2022. Embrapa Soja, 2023.

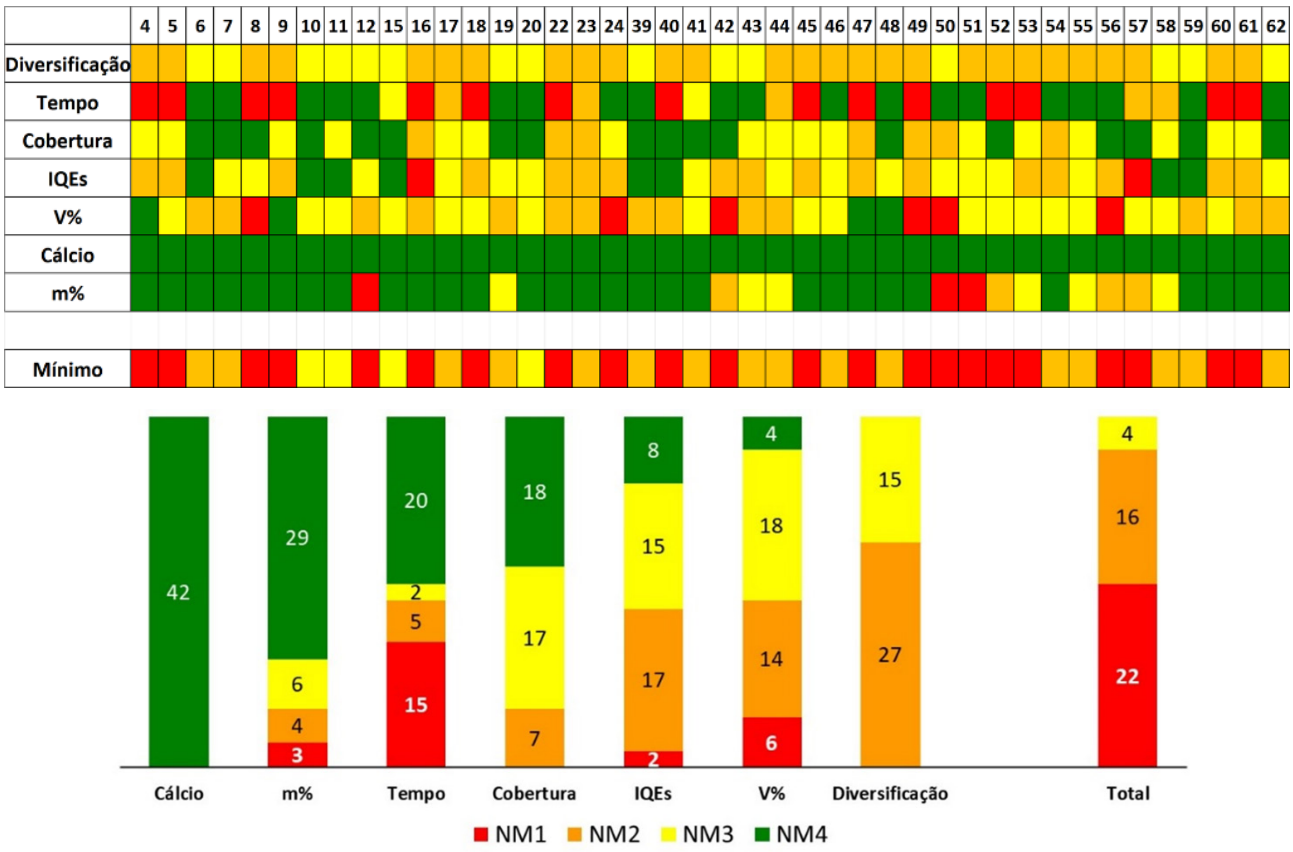


Figura 6. Enquadramento das glebas em solos originados do basalto nos níveis de manejo, de acordo com os indicadores e critérios. Embrapa Soja, 2023.

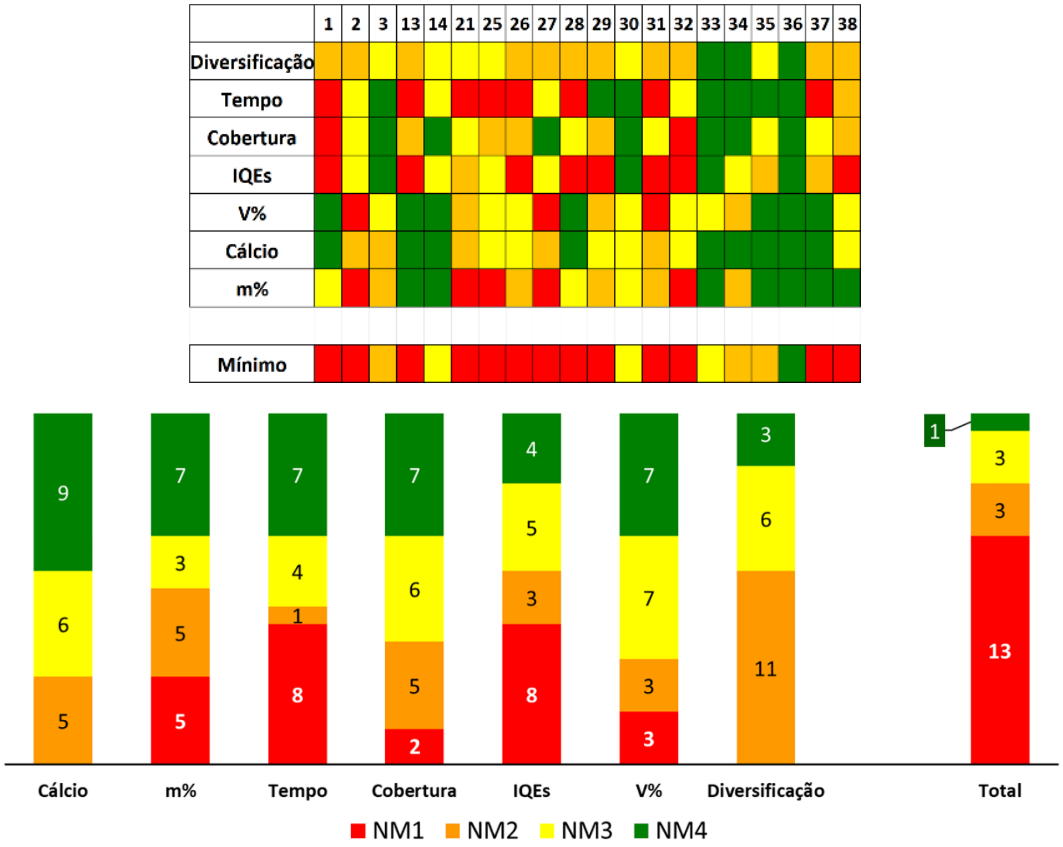


Figura 7. Enquadramento das glebas em solos originados do arenito nos níveis de manejo, de acordo com os indicadores e critérios. Embrapa Soja, 2023.

Enfatiza-se que a diversificação de culturas é operacionalizada por meio do planejamento e adoção de um determinado modelo de produção, que compreende o arranjo temporal e espacial das espécies vegetais e/ou animais que compõem os sistemas agrícolas produtivos (Denardin; Kochhann, 2006). Em um modelo de produção, as estratégias para diversificação de espécies vegetais envolvem o uso da rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas.

Para o tempo sem revolvimento do solo, 23 glebas foram enquadradas no NM 1, 6 no NM 2, 6 no NM 3 e 27 no NM 4 (Figura 5). Ou seja, o preparo recorrente do solo, que na maioria dos casos pode estar sendo realizado sem obedecer a critérios técnicos, é um dos indicadores que impedem 29 áreas (47%) de serem enquadradas nos NM 3 ou 4. Nas áreas de basalto, 15 foram enquadradas no NM 1, 5 no NM 2, 2 no NM 3 e 20 no NM 4 (Figura 6). Nas áreas de arenito, 8 foram enquadradas no NM 1, 1 no NM 2, 4 no NM 3 e 7 no NM4 (Figura 7). Em geral, percebeu-se a predominância do enquadramento nos NM 1 e 4 para esse indicador. Quase metade das glebas avaliadas foi categorizada como NM 1 ou 2, indicando que o preparo esporádico do solo é algo frequente nas regiões avaliadas. De acordo com os relatos dos produtores, o preparo do solo é realizado fundamentalmente na pré-semeadura da soja, com o objetivo de descompactar o solo, incorporar corretivos e/ou controlar plantas daninhas resistentes ao glifosato, especialmente buvas (*Conyza* spp.) e capim-amargoso (*Digitaria insularis*). Enfatiza-se que esse indicador foi obtido por meio do relato dos produtores, mas pode ser checado por meio de imagens de satélites, assim como a diversificação de espécies cultivadas e a cobertura do solo por palha (Franchini et al., 2023).

O preparo frequente do solo, sem critério técnico, limita a produção das culturas e prejudica o meio ambiente. Nesse sentido, o revolvimento do solo aumenta os riscos de erosão hídrica (Dechen et al., 2015), a magnitude dos picos de temperatura do solo (Bragagnolo; Mielniczuk, 1990; Torres et al., 2010) e as perdas de água por evaporação (Debiasi et al., 2022), bem como acelera a minera-

lização da matéria orgânica do solo (MOS) incrementando as emissões de gases de efeito estufa e impactando negativamente sobre a qualidade do solo (Bayer et al., 2016; Monteiro et al., 2023). Adicionalmente, o mínimo revolvimento do solo, evitando-se operações de preparo sem critério técnico, é uma estratégia para manter e melhorar a estrutura do solo. O uso de implementos de hastes (escarificadores/subsoladores) e de discos (arados e grades) provoca desagregação excessiva na região mobilizada e, dependendo da situação, pode resultar em uma camada compactada logo abaixo da profundidade de trabalho (pé-de-arado ou pé-de-grade). Moraes et al. (2020) mostraram que a compactação subsuperficial pode ocorrer inclusive em operações de preparo do solo com implementos de hastes, como escarificadores e subsoladores. Esses autores encontraram aumento da resistência à penetração (RP) na camada imediatamente abaixo da revolvida por meio de escarificador (28-35 cm), evidenciando formação de camada compactada subsuperficial pela ação das ponteiras do implemento. Ressalta-se, também, que as pressões aplicadas pelos rodados das máquinas agrícolas atingem maiores profundidades quando o tráfego ocorre em solos soltos e/ou úmidos, com menor resistência. Isso significa que o tráfego em solos soltos, desestruturados, pode induzir a compactação em subsuperfície, como detectado por Silva et al. (2012) e Soriani (2020).

No tocante à cobertura do solo medida logo após a semeadura da soja, 2 glebas foram enquadradas no NM 1, 12 no NM 2, 23 no NM 3 e 25 no NM 4 (Figura 5). Nos solos originados do basalto, 7 glebas foram enquadras no NM 2, 17 no NM 3 e 18 no NM 4 (Figura 6). Ou seja, nenhuma área apresentou cobertura inferior a 45%. Nos solos originados do arenito, 2 glebas foram enquadradas no NM 1, 5 no NM 2, 6 no NM 3 e 7 no NM 4 (Figura 7). Assim, no total, 24% das áreas agrícolas avaliadas precisam melhorar a cobertura do solo para passar dos NM 1 ou 2 para os NM 3 ou 4, proporção essa que foi maior nas glebas do Arenito (35%) em relação ao Basalto (17%). Nesse contexto, averiguou-se maior dificuldade de formação e manutenção de palhada nos solos arenosos, comparativamente aos argilosos. Na região Noroeste do PR, onde estão localizadas as glebas do arenito, além da maior probabilidade de restrição hídrica pela menor água disponível, as temperaturas são mais elevadas em relação às áreas do basalto (Nitsche et al., 2019). Com isso, há maior dificuldade em 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 2ª safra, onde existe em um intervalo de quase 90 dias sob pousio, entre a colheita do milho e a semeadura da soja. Assim, no Noroeste do PR, um sistema indicado é a integração da soja com pastagens anuais de inverno, como o utilizado nas áreas 33, 34 e 36, ou o uso de coberturas do solo com alta produção de biomassa, como a braquiária ruziziensis (áreas 3, 35 e 37), por exemplo.

Uma 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 da gota 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 (Derpcsh 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) compilou dados de 16 experimentos e observou que a 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 constituem-se 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 28º C e, a partir de 30º C, houve redução linear nesse parâmetro, de forma que, a cada aumento de 1º C na temperatura, o CCR diminui 8%. Além de limitar o alongamento radicular, valores extremos de temperaturas de solo prejudicam o funcionamento das raízes, diminuindo a absorção de água e nutrientes (Nielsen, 1974).

A cobertura do solo por resíduos vegetais pode ser medida de forma direta no campo, pelo método do transecto, utilizado na presente pesquisa (Richards et al., 1984; Morrison et al., 1993) ou via imagens (Varella et al., 2002; Jorge; Silva, 2009). O sensoriamento remoto tem demonstrado que o percentual de cobertura do solo com resíduos vegetais pode ser determinado com precisão, utilizando a reflectância da celulose e lignina na região do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Hively et al., 2018). A diferença de refletância entre o resíduo vegetal e o solo na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR 1 e SWIR2), expressa por meio do índice NDTI (SWIR1 – SWIR2/SWIR1 + SWIR2) (*Normalized Difference Tillage Index*), permite estabelecer relações precisas com a porcentagem de cobertura do solo por resíduos vegetais (Daughtry, 2001; Daughtry et al., 2004, 2006; Beeson et al., 2016; Hively et al., 2018; Beeson et al., 2020). Usando essa abordagem, Franchini et al. (2023) estimaram a cobertura do solo por palha na pré-semeadura da soja por meio de imagens de satélite. Esse é um exemplo de como o sensoriamento remoto pode auxiliar na avaliação do indicador de cobertura do solo por palha.

Para o IQEs, 10 glebas foram enquadradas no NM 1, 20 no NM 2, 20 no NM3 e 12 no NM 4 (Figura 5). No geral, 48% das áreas necessitam de melhoria da qualidade estrutural do solo para subir do NM 1 e 2 para, no mínimo, NM 3. Para o basalto, 2 glebas foram enquadradas no NM 1, 17 no NM 2, 15 no NM 3 e 8 no NM 4 (Figura 6). Para o arenito, 8 glebas foram enquadradas no NM 1, 3 no NM 2, 5 no NM 3 e apenas 4 no NM 4 (Figura 7). Nesse sentido, os resultados obtidos revelam maiores limitações estruturais nos solos arenosos em relação aos argilosos, especialmente pela reduzida agregação, típica em solos com teores de argila menores que 20%. Nesse caso, a inserção de espécies forrageiras tropicais para pastejo ou para cobertura do solo, que apresentam sistema radicular vigoroso, é importante para incrementar a formação de agregados estáveis de 1 a 4 cm, com baixa coesão, faces de ruptura rugosas, arredondados, e linhas de ruptura sem orientação definida, o que foi comprovado por Tonon-Debiasi et al. (2024). Em trabalho desenvolvido por Balbinot Junior et al. (2017), verificou-se que as raízes de braquiária ruziziensis ou de braquiária brizanta cv. BRS Piatã tiveram maior efeito positivo na produtividade da soja em sucessão do que a palha dessas forrageiras, indicando a elevada importância do sistema radicular dessas espécies na estruturação do solo e, provavelmente, na formação de bioporos contínuos e estáveis. A contribuição das raízes de trigo e aveia preta no aumento da produtividade da soja em sucessão sob SPD também foi observada por Balbinot Junior et al. (2020).

A destruição dos agregados, seja por pulverização ou compactação excessivas, leva à degradação da fertilidade estrutural do solo gerando, entre outros problemas, estresses físicos que limitam o crescimento das plantas e de suas raízes (Moraes et al., 2020). Camadas de solo excessivamente solto ou pulverizado apresentam como características a baixa densidade, a alta proporção de macroporos e a descontinuidade do sistema poroso. No curto prazo, essas características significam altas taxas de infiltração de água, baixa resistência mecânica ao crescimento das raízes e elevada capacidade de aeração. Todavia, essa condição prejudica a retenção de água, a condutividade hidráulica não saturada e o contato solo-raiz, especialmente em solos de textura média a arenosa (Ortigara, 2017; Moraes et al., 2018), o que pode reduzir a produtividade e limitar o crescimento das raízes por estresse hídrico (Bertollo et al., 2021). Além disso, a pulverização dos agregados implica em baixa resistência ao carregamento pela água da chuva e à deformação pelo tráfego de

máquinas ou pisoteio animal. Assim, solos pulverizados são altamente suscetíveis à degradação por compactação e erosão. Por outro lado, a degradação por compactação excessiva reduz a disponibilidade hídrica às plantas, em função da menor infiltração, condutividade hidráulica e volume de poros que retém água disponível (Moraes et al., 2016). Além disso, a compactação se reflete em impedimento mecânico à elongação radicular e, no caso de períodos excessivamente chuvosos, em limitação de suprimento de oxigênio às raízes. Portanto, a compactação limita a produtividade das culturas e o crescimento das raízes, sobretudo em anos secos ou com excesso de chuvas.

A saturação da CTC por bases é um dos principais indicadores químicos de qualidade de manejo do solo. Do total de glebas avaliadas, 9 foram enquadradas no NM 1, 17 no NM 2, 25 no NM 3 e 11 no NM 4 (Figura 5). No basalto, 6 glebas foram enquadradas no NM 1, 14 no NM 2, 18 no NM 3 e 4 no NM 4 (Figura 6). No arenito, 3 glebas foram enquadradas no NM 1, 3 no NM 2, 7 no NM 3 e 7 no NM 4 (Figura 7). Assim, em 42% das áreas avaliadas há necessidade de aumento do V% na camada de 0-20 cm para mudança de NM 1 ou 2 para o NM 3, indicando a necessidade de calcário. A V% foi mais limitante nos solos de basalto, onde 48% apresentaram necessidade de calagem para mudança de NM 1 ou 2 para NM 3, ao passo que essa proporção foi de 30% no nos solos de arenito. Salienta-se que aumento do V% na camada superficial é uma melhoria de manejo que envolve custos significativos com corretivos, mas que pode ser realizada em prazo relativamente curto (< 3 anos), sem mobilização do solo na maioria dos casos.

O teor de Ca trocável no perfil do solo é um importante atributo químico para o crescimento radicular das culturas. Nas 62 glebas avaliadas, nenhuma foi enquadrada no NM 1, 5 foram categorizadas como NM 2, 6 no NM 3 e 51 no NM 4 (Figura 5). No basalto, as 42 glebas avaliadas foram enquadradas no NM 4 (Figura 6). No arenito, 5 glebas foram enquadradas no NM 2, 6 no NM 3 e 9 no NM 4 (Figura 7). Nesse solo, 25% das áreas precisam utilizar práticas agrícolas para aumentar o teor de Ca trocável na camada de 20-40 cm buscando atingir os NM 3 ou 4. Os solos originados do basalto, em geral, apresentam teores altos de Ca, por isso em todas as áreas avaliadas não se constatou restrições ao crescimento radicular da soja quanto ao teor de Ca na camada de 20-40 cm. Por outro lado, no arenito observou-se a necessidade de aumento no teor de Ca em 5 glebas para passar do NM 2 para o NM 3. Essa correção pode ser realizada com a aplicação de calcário ou gesso agrícola.

A presença de Al tóxico no perfil do solo limita expressivamente o crescimento radicular da soja. A maioria das glebas avaliadas não apresentou Al na camada de 20-40 cm, sendo que 8 glebas foram enquadradas no NM 1, 9 no NM 2, 9 no NM 3 e 36 no NM 4 (Figura 5). Considerando as glebas presentes em solos originados do basalto, 3 foram enquadradas no NM 1, 4 no NM 2, 6 no NM 3 e 29 no NM 4 (Figura 6). No arenito, 5 glebas foram enquadradas no NM 1, 5 no NM 2, 3 no NM 3 e 7 no NM 4 (Figura 7). Nesse sentido, 73% das áreas avaliadas foram enquadradas nos NM 3 ou 4. Outro ponto relevante é que as restrições por Al foram mais frequentes nos solos do arenito do que do basalto, assim como ocorreu para o teor de Ca trocável. Ou seja, a calagem e/ou gessagem corrigiria as limitações de Ca e presença de Al.

Do ponto de vista químico, as limitações ao crescimento radicular estão associadas, em primeiro lugar, à presença de elevados teores de alumínio trocável (Al^{3+}) e aos baixos teores de cálcio (Ca^{2+}) no perfil do solo, resultantes da acidez excessiva. O efeito tóxico do Al^{3+} ao sistema radicular das plantas causa inibição da divisão celular, desorganização dos meristemas e necrose dos tecidos o que, por sua vez, leva à redução do crescimento e das ramificações, ao engrossamento e à necrose das raízes (Tedesco; Bissani, 2004). Além disso, o crescimento das raízes em uma determinada camada é condicionado à presença de Ca^{2+} junto aos pontos de crescimento, tendo em vista o seu

papel na formação da parede celular e que este nutriente não é móvel na planta via floema, ou seja, não pode ser translocado da parte aérea para as raízes (Malavolta, 1980).

Com base no fundamento de que o crescimento das raízes de soja pode ser limitado por qualquer um dos indicadores, desde que não esteja em níveis adequados, independente dos demais, o enquadramento total das glebas foi considerado, nesse momento, como sendo aquele do fator mais limitante. Nesse caso, se apenas um dos sete indicadores for enquadrado como NM 1, o NM total da gleba será 1, mesmo que os demais sejam enquadrados em NM superiores. Apesar dessa abordagem ser bastante rígida, ela tem como vantagem o esforço de diagnóstico e correção de indicadores que mais estão limitando o crescimento radicular da soja e, consequentemente, a produtividade e tolerância à seca da cultura.

Com base nessa premissa, 35 glebas tiveram enquadramento total no NM 1 (56,4%), 19 no NM 2 (30,6%), 7 no NM 3 (11,3%) e apenas 1 no NM 4 (1,7%) (Figura 5). No basalto, 22 glebas foram enquadradas no NM 1, 16 no NM 2 e 4 no NM 3 (Figura 6). No arenito, 13 glebas foram enquadradas no NM 1, 3 no NM 2, 3 no NM 3 e 1 no NM 4 (Figura 7). De acordo com esses resultados, a região do arenito apresentou a maior proporção de glebas enquadradas no NM 1, equivalente a 65%, contra 52% no basalto. A única gleba enquadrada no NM 4 foi a 36, presente no arenito, em que a implantação da soja foi realizada em SPD após pastagem perene, na ausência de restrições químicas ao crescimento de raízes da soja. Isso corrobora o efeito das pastagens perenes em aprimorar a qualidade estrutural do solo e disponibilizar adequada palhada à semeadura da soja em sucessão.

Em função de que os NM 3 e 4 são os mais adequados, uma análise oportuna é avaliar o número de indicadores que estão nos NM 1 e 2 em cada gleba (Figura 8), bem como caracterizá-los verificando as combinações que mais frequentemente limitaram a qualidade do manejo nas áreas avaliadas (Tabela 4). Das 12 áreas com apenas 1 indicador nos NM 1 ou 2 (Figura 8), a acidez na camada de 0-20 cm, expressa pelos baixos valores de V%, foi limitante em 6 (50%), enquanto que a baixa diversificação de culturas no modelo de produção impediu a gleba de atingir ao menos o NM 3 em 4 casos (35%) (Tabela 4). Ou seja, a correção da acidez do solo e a melhoria da diversificação de culturas no modelo de produção permitiria que 10 das 12 áreas (83%) atingissem pelo menos o NM 3. Nas 6 glebas com 2 indicadores enquadrados nos NM 1 e 2, novamente a diversificação de culturas e a acidez superficial (V%) ou subsuperficial (m%) foram aqueles mais frequentemente apontados como limitantes ao alcance de um melhor NM. Nesse grupo de dois indicadores limitantes, a correção da acidez e o aprimoramento dos modelos de produção, feitos de forma simultânea, permitiriam que 4 das 6 áreas passassem para o NM 3 (Tabela 4).

Tabela 4. Número de glebas agrícolas enquadradas nos níveis de manejo 1 ou 2, agrupadas em função de combinações de indicadores limitantes.

Indicadores limitantes (NM 1 ou NM 2)		Número de glebas limitadas[2]
Número	Descrição[1]	
1	V% Diversificação Tempo IQEs	6 4 1 1
2	Ca + m% V% + m% Diversificação + Tempo IQEs + V% Diversificação + m% Diversificação + IQEs	1 1 1 1 1 1
3	Diversificação + Tempo + IQEs Diversificação + Tempo + V% Diversificação + IQEs + V% Diversificação + Tempo + m% Diversificação + Cobertura + IQEs IQEs + V% + m% Cobertura + Tempo + m% Cobertura + V% + m%	9 3 1 1 1 1 1 1
4	Diversificação + Tempo + Cobertura + IQEs Diversificação + V% + Ca + m% Diversificação + Cobertura + IQEs + m% Diversificação + IQEs + V% + m% Diversificação + Tempo + IQEs + m% Diversificação + Tempo + IQEs + V%	4 2 1 1 1 1
5	Diversificação + Tempo + Cobertura + IQEs + V% Diversificação + Tempo + Cobertura + IQEs + m% Diversificação + Cobertura + IQEs + V% + m% Tempo + IQEs + V% + Ca + m%	4 1 1 1
6	Diversificação + Tempo + IQEs + V% + Ca + m%	1

[1] Indicadores conforme descrição constante da Tabela 1; (2) Indica o número de glebas enquadradas nos NM 1 ou NM 2 em função do indicador constante na mesma linha da coluna anterior.

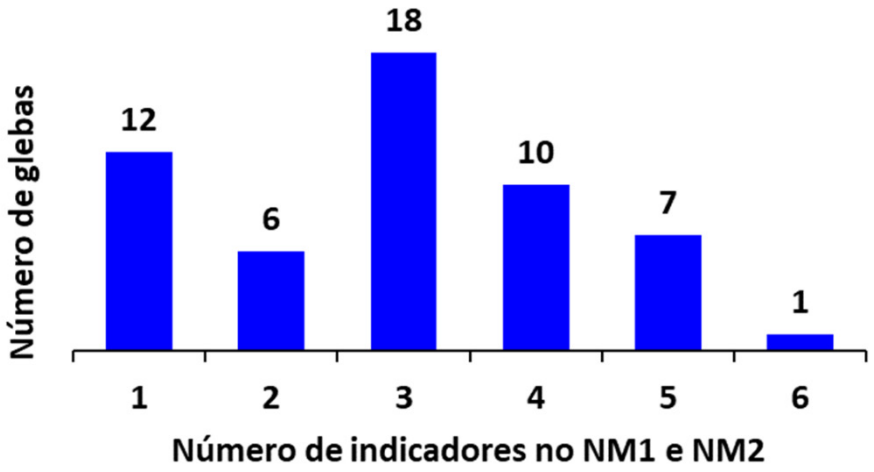


Figura 8. Número de glebas com diferentes números de indicadores enquadrados nos níveis de manejo (NM) 1 e 2. Embrapa Soja, 2023.

Ainda com relação aos dados da Figura 8, verifica-se que 36 das 54 glebas enquadradas nos piores NM (1 e 2) apresentaram três ou mais indicadores que impediram o enquadramento, pelo menos, no NM 3 (Tabela 4). Das 18 glebas com 3 indicadores limitantes, a combinação entre baixa diver-

sificação de culturas, preparo frequente (tempo) e degradação da estrutura do solo (IQEs) ocorreu em 9 áreas (50%). Observa-se ainda que pelo menos um desses três indicadores foi limitante em 17 áreas. A acidez superficial (V%) ou subsuperficial (m%) apareceu como fator limitante nessas combinações em 8 das 18 áreas (44%). Das 10 glebas com quatro indicadores limitantes, a combinação mais frequente (4 casos) envolveu novamente a baixa diversificação, o preparo do solo frequente (tempo) e a degradação da qualidade estrutural do solo (IQEs), acrescido da baixa porcentagem de cobertura. Em 70% das áreas com quatro fatores limitantes, pelo menos 3 dos 4 indicadores que originaram a combinação mais frequente (diversificação, tempo, cobertura e IQEs) foram enquadrados nos NM 1 ou 2 (Tabela 4). Interessantemente, em 5 das 8 glebas apresentando 5 ou 6 indicadores limitantes (ou seja, mais de 60% dos casos), o conjunto mais frequente envolveu indicadores presentes nas principais combinações anteriores, ou seja, baixa diversificação, revolvimento frequente (tempo), degradação da estrutura (IQEs) e cobertura insuficiente, acrescidos de acidez superficial (V%) ou acidez subsuperficial (m%). Por sua vez, o trio de indicadores (diversificação, tempo e IQEs) foi classificado simultaneamente como limitante ao alcance do NM 3 em 6 das 8 áreas (75%) (Tabela 4).

Os resultados apresentados anteriormente apontam para a existência de relações causa-efeito entre diversificação, tempo sem revolvimento, degradação estrutural e porcentagem de cobertura do solo. Possivelmente, áreas com baixa diversificação de culturas e revolvimento frequente levam à degradação da estrutura e à redução da cobertura, explicando assim a ocorrência simultânea dessas limitações. Entretanto, chama a atenção o fato da baixa porcentagem de cobertura do solo aparecer na combinação mais frequente apenas em áreas com quatro ou mais indicadores limitantes, mesmo que a pesquisa aponte a cobertura do solo com palha como um dos principais fatores a serem aprimoradas para aumentar a produtividade de grãos com sustentabilidade e estabilidade (Denardin; Kochhann, 2006; Andrade, 2008; Dechen et al., 2015; Balbinot Junior et al., 2017, 2020; Debiasi et al., 2021, 2022). É possível que os valores de porcentagem de cobertura para enquadramento nos NM 3 e 4 estejam subestimados, diminuindo o potencial grau de limitação imposto por esse indicador e, em consequência, apontando para a necessidade de ajustes nesses parâmetros, com o avanço nos estudos de validação.

Considerando a caracterização dos indicadores limitantes para que as glebas enquadradas nos NM 1 e 2 alcancem ao menos o NM 3 (Tabela 4), nota-se que a utilização de modelos de produção mais diversificados e com maior aporte de palha e raízes, em conjunto com a correção da acidez superficial e subsuperficial do solo, permitiriam que 15 áreas subissem, no curto prazo (de 1 a 3 anos) para o NM 3, aumentando o número total de 7 (11%) para 22 (35%) glebas enquadradas neste NM. A adoção da premissa do não revolvimento do solo possibilitaria que mais quatro glebas alcançassem o NM 3 no curto-médio prazo, resultando em um número total de 26 áreas (42%). Com o aprimoramento dos indicadores diversificação e tempo, é provável que a porcentagem de cobertura do solo e o IQEs melhorem no médio-longo prazo, fazendo com que gradualmente mais glebas sejam enquadradas nos NM 3 e 4.

De forma geral, observou-se que quanto maior o NM para o indicador diversificação de espécies cultivadas, maior foi a média do IQEs (Figura 9). Nas glebas com NM 2 para diversificação, a média de IQEs foi ligeiramente inferior a 3. Por outro lado, nas glebas com NM 4 para diversificação, a média de IQEs foi superior a 4. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam a contribuição de modelos de produção diversificados, com a inserção de espécies com crescimento radicular vigoroso, na melhoria da qualidade estrutural do solo, corroborando resultados de pesquisas (Bertollo et al., 2021).

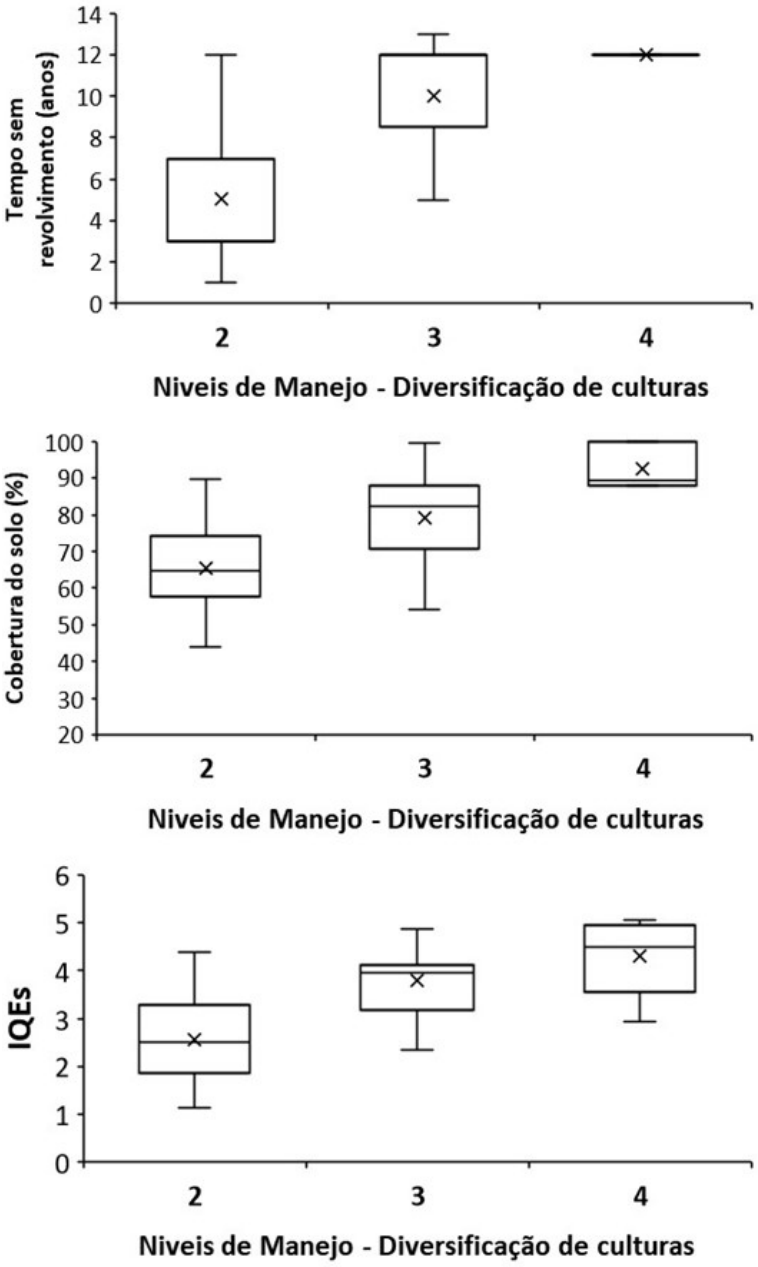


Figura 9. Relação entre os níveis de manejo para o indicador diversificação de culturas com a índice de qualidade estrutural do solo, a porcentagem de cobertura do solo com palha na semeadura da soja e com o tempo sem revolvimento. Embrapa Soja, 2023.

Houve relação entre os NM para a diversificação com a cobertura do solo na semeadura da soja (Figura 9). No NM 2 para a diversificação, a média de cobertura do solo com palha foi próxima de 65% ao passo que no NM4 a média de cobertura foi próximo de 90%. Essa relação já era esperada, uma vez que sistemas diversificados na entressafra da soja, em geral, propiciam maior produção de biomassa e cobertura do solo com palha, contribuindo para a sustentabilidade do SPD. Adicionalmente, no NM 2 para diversificação, o tempo médio sem revolvimento do solo foi próximo de 6 anos, enquanto nos NM 3 e 4 foi próximo de 10 anos, indicando que os produtores que utilizam modelos mais diversificados também evitam mobilizar o solo (Figura 9). Esses resultados demonstram que as glebas com maior diversificação tenderam a apresentar melhores valores para os indicadores de IQEs, cobertura do solo e tempo sem revolvimento, o que reforça os resultados da Tabela 4, em que esses indicadores apareceram em combinação mútua como limitantes para diversas glebas atingirem os NM 3 e 4. Em trabalhos desenvolvidos por Garbelini et al. (2020, 2022), constatou-se aumento de rentabilidade com o uso de modelos de produção com maior diversificação de espécies cultivadas, comparativamente ao modelo de sucessão soja/milho segunda safra.

Houve correlação positiva e significativa entre a cobertura do solo com palha na semeadura da soja e o IQEs nas 62 glebas avaliadas (Figura 10). Isso possivelmente ocorreu porque os modelos de produção que permitem maior produção de biomassa também impactam positivamente na qualidade estrutural do solo, especialmente em função do crescimento vigoroso de raízes. Dessa forma, percebe-se que os aprimoramentos nos modelos de produção impactam direta e positivamente em outros indicadores de qualidade de manejo do solo, permitindo a evolução de NM 1 e 2 para os NM 3 e 4, conforme caracterizado pelos resultados constantes da Tabela 4.

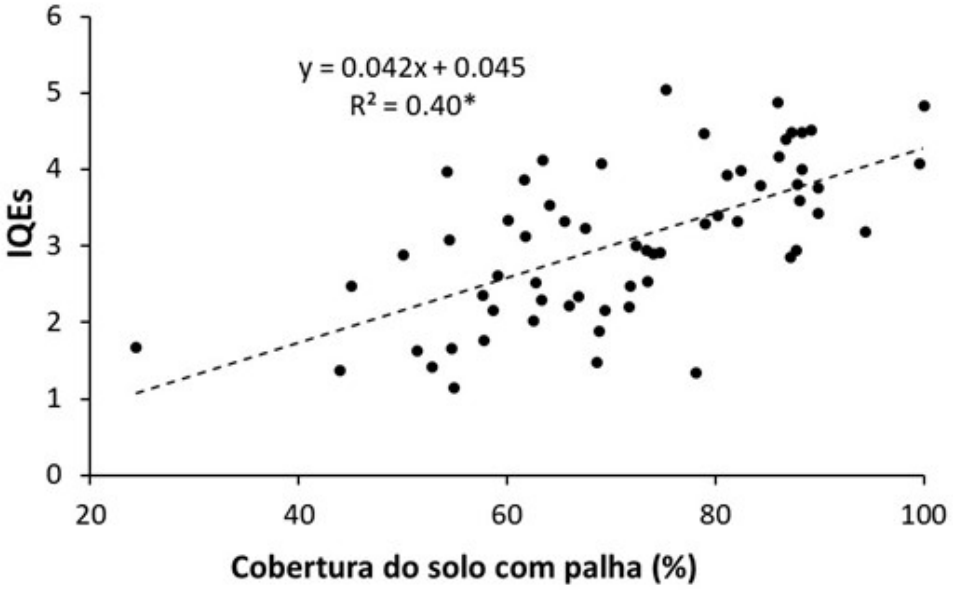


Figura 10. Relação entre a cobertura do solo com palha na semeadura da soja e o índice de qualidade estrutural do solo (IQEs) nas 62 glebas avaliadas. * Modelo significativo (p<0,05). Embrapa Soja, 2023.

No tocante aos indicadores relacionados à acidez do solo, verificou-se correlação positiva e significativa entre o V% na camada de 0-20 cm e os teores de Ca trocável na camada de 20-40 cm (Figura 11). Essa correlação já era esperada, uma vez que a aplicação de corretivos propicia aumentos do V% na superfície e, ao longo do tempo, nos teores de Ca em subsuperfície (Oliveira; Pavan, 1996; Caires et al., 2008; Rheinheimer et al., 2018). Provavelmente, a relação não foi superior porque esses dois indicadores são avaliados em camadas distintas do solo.

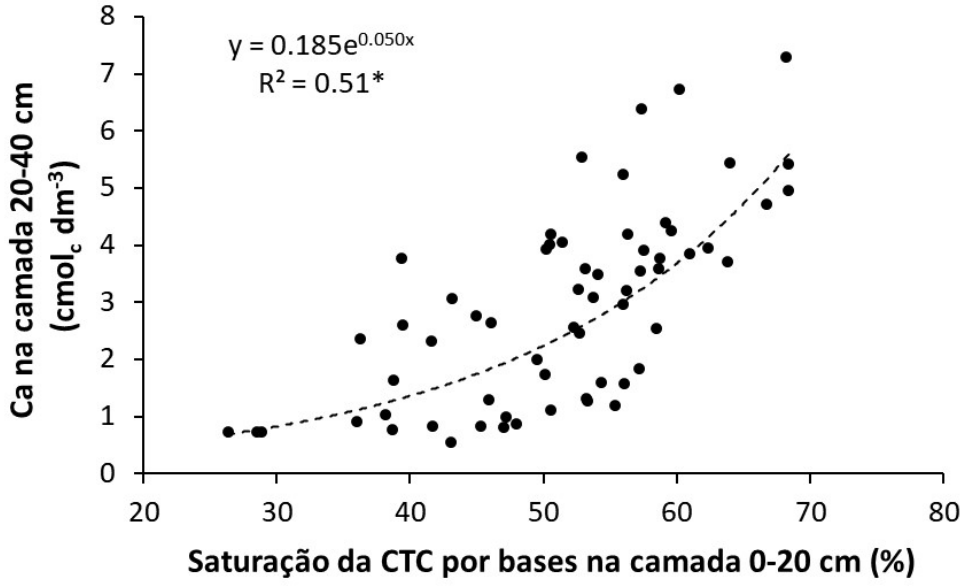


Figura 11. Relação entre a saturação da CTC por bases na camada de 0-20 cm (%) e o teor de cálcio trocável na camada de 20-40 cm (cmolc dm^{-3}), nas 62 glebas avaliadas. * Modelo significativo (p<0,05). Embrapa Soja, 2023.

Na Figura 12, é apresentada a ocorrência dos níveis de manejo nas quatro classes de Água Disponível (AD), a qual é estimada exclusivamente pelos teores de argila, silte e areia do solo. Das 62 glebas avaliadas, 7 foram caracterizadas na classe AD1 e 10 na classe AD2. Nesse caso, são glebas localizadas em solos originados do arenito. Nas classes AD3 e AD4 foram enquadradas 7 e 38 glebas, respectivamente, sendo 3 no arenito e o restante no basalto. Nesse sentido, sob o ponto de vista de tolerância à seca, a qualidade de manejo do solo pode ter impacto maior e mais rápido nas glebas que apresentam AD nas classes 1 e 2, uma vez que a textura do solo limita a AD e o aprofundamento do sistema radicular passa a ser a única alternativa para aumentar o tamanho do reservatório de água. Isso ficou exemplificado pelos resultados obtidos neste estudo, onde foram avaliadas 20 glebas localizadas em solos derivados do arenito e apenas 3 delas apresentaram NM 3 e uma o NM 4, o que somado representa 20% das glebas. Por outro lado, foram avaliadas 42 glebas em solos derivados do basalto, sendo 38 delas na classe AD4, porém apenas 4 apresentaram NM 3, 9,5% das glebas, ou seja, a grande maioria delas foram classificadas como NM 1 e NM 2. Apesar da maior quantidade de água disponível nos solos originados do basalto, e teoricamente maiores oportunidades para diversificação de espécies, isso não está sendo colocado em prática, com reflexos negativos na qualidade de manejo de solos muito argilosos sujeitos a perda de qualidade estrutural por compactação excessiva. Desta forma, é possível perceber que o melhor manejo do solo oferecido pelos sistemas de integração lavoura pecuária avaliados no arenito, proporcionalmente teve maior impacto na quantidade de glebas com melhor NM em relação ao basalto.

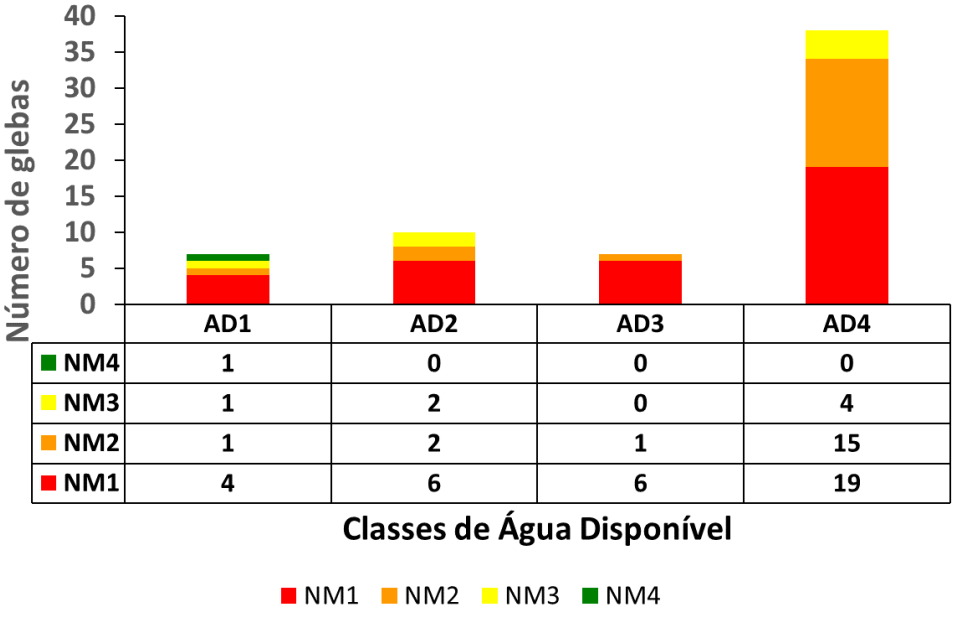


Figura 12. Número de glebas enquadradas nas diferentes classes de água disponível (AD) e níveis de manejo (NM). Embrapa Soja, 2023.

Considerações finais

A pesquisa realizada permitiu a análise dos sete indicadores de qualidade de manejo do solo sugeridos por Debiasi et al. (2022) em 62 glebas agrícolas das regiões Norte, Noroeste e Oeste do Paraná. De acordo com os critérios definidos para cada indicador, os fatores mais importantes que levaram o enquadramento das glebas como Nível de Manejo (NM) 1, o menos adequado foram, em ordem: tempo sem revolvimento do solo, Índice de Qualidade Estrutural do solo (IQEs), saturação da CTC por bases na camada de 0-20 cm (V%), saturação da CTC por alumínio na camada de 20-40 cm (m%) e cobertura do solo na semeadura da soja. Adicionalmente, os principais fatores que limitaram o enquadramento das glebas nos NM 1 ou 2 foram, em ordem: diversificação de espécies cultivadas nos últimos três anos, IQEs, tempo sem revolvimento, V%, m%, cobertura do solo na semeadura da soja e teor de cálcio na camada de 20-40 cm. Nesse sentido, foi possível enquadrar as glebas nos quatro NM sugeridos por Debiasi et al. (2022) e identificar os indicadores mais limitantes para o aprimoramento da qualidade de manejo do solo.

O enquadramento final da qualidade de manejo do solo levando em consideração o indicador mais limitante entre os sete avaliados é um critério bastante rígido, o que limita o enquadramento nos NM 3 e 4. No entanto, é o critério mais adequado, uma vez que o crescimento de raízes e, consequentemente a produtividade e a tolerância ao déficit hídrico, serão limitados pelo indicador mais restritivo, independente dos demais indicadores. É a lei dos mínimos, sugerida pela primeira vez por Liebig, no século 19.

Os resultados revelaram que as glebas enquadradas nos NM 3 e 4 para o indicador diversificação de espécies cultivadas apresentaram melhores valores de IQEs e cobertura do solo na semeadura da soja, comparativamente às glebas enquadradas no NM 2. Esse resultado comprova, em escala de lavouras, que a diversificação é uma prática que afeta diretamente outros indicadores de qualidade do solo. Além disso, constataram-se correlações positivas entre a cobertura do solo com palha e IQEs e entre V% na camada de 0-20 cm e teores de cálcio trocável na camada de 20-40 cm.

Como toda a metodologia em fase de validação, ajustes nos critérios para o enquadramento nos NM certamente são necessários, exigindo a continuidade desse trabalho com a inclusão de um número maior de áreas e aplicação em outras regiões. No presente estudo, evidenciou-se a necessidade de reavaliar os critérios do indicador diversificação de culturas, principalmente dentro dos requisitos para o NM 4, bem como os valores mínimos de porcentagem de cobertura para enquadramento nos NM 3 e 4.

Sob o ponto de vista das práticas agrícolas, a correção da acidez superficial e subsuperficial via 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-longo prazo grande parte das áreas migrasse para os NM 3 e 4.

Agradecimentos

À Cocamar Cooperativa Agroindustrial pelo financiamento do projeto 507 - FAPED/CNPSO/DIVER$IFICA+ (21199.001216/2019-19), denominado “Transferência de tecnologias e difusão de conhecimentos com base em avaliações de impacto regionalizadas para o aprimoramento do manejo do solo em sistemas de produção de grãos no Estado do Paraná”, cujas atividades originaram os resultados da safra 2019/2020.

À Itaipu Binacional pelo financiamento do projeto 725 - FAPED/ITAIPU/EMBRAPA SOJA - CONVÊNIO N° 4500059808, denominado “Inovações na abordagem temática para a conservação de solo e água em bacias hidrografias no entorno da Represa de Itaipu”, cujas ações de pesquisa deram origem aos resultados obtidos na safra 2021/2022.

À cooperativas Coopavel, Copacol, Coamo e Cocamar, pela indicação de áreas de seus cooperados para realização deste trabalho de pesquisa.

Aos agricultores que gentilmente cederam as áreas de produção para a realização deste estudo.

Referências

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 em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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 & Biochemistry**, v. 42, 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. DOI: 10.1007/s42106-023-00267-y.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; COELHO, A. E.; SAPUCAY, M. J. L. 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, p. 592-598, 2017.

BAYER, C.; GOMES, J.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; DIECKOW, J. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 161, p. 86-94, 2016.

BEESON, P. C.; DAUGHTRY, C. S. T.; HUNT, E. R.; AKHMEDOV, B.; SADEGHI, A. M.; KARLEN, D. L.; TOMER, M. D. Multispectral satellite mapping of crop residue cover and tillage intensity in Iowa. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, p. 385-395, 2016.

BEESON, P. C.; DAUGHTRY, C. S. T.; WALLANDER, S. A. Estimatives of conservation tillage practices using Landsat archive. **Remote Sensing**, v. 12, 2665, 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 & 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.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 532-540, 2008.

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, p. 204-212, 2013.

DAUGHTRY, C. S. T. Agroclimatology: discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 125-131, 2001.

DAUGHTRY, C. S. T.; DORAISWAMY, P. C.; HUNT, E. R.; STERN, A. J.; McMURTREY, J. E.; PRUEGER, J. H. Remote sensing of crop residue cover and soil tillage intensity. **Soil & Tillage Research**, v. 91, p. 101-108, 2006.

DAUGHTRY, C. S. T.; HUNT, E. R.; McMURTREY, J. E. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 126-134, 2004.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CONTE, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; OLIVEIRA, M. C. N. de. **Sistemas de preparo do solo**: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 72 p. (Embrapa Soja. Documentos, 342).

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.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; FRANCHINI, J. C.; FARIAS, J. R. B.; CONTE, O.; CUNHA, G. R.; MORAES, M. T.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M.; 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. de F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, p. 224-233, 2015.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água. In: REUNIÃO SULBRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006, Passo Fundo. Fertilidade em solo... (re) emergindo sistêmica: **resumos e palestras**. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2006. 8 p. 1 CD-ROM.

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 & Tillage Research**, v. 8, p. 253-263, 1986.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; NITSCHE, P. R.; DEBIASI, H.; LOPES, I. de O. N. **Variabilidade espacial e temporal da produção de soja no Paraná e definição de ambientes de produção**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 42 p. (Embrapa Soja. Documentos, 374).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FARIAS, J. R. B.; MONTEIRO, J. E. B. A.; SANTOS, E. L.; SARTORI, A. A. 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, 2023. 33 p. (Embrapa Soja. Documentos, 454).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R. de; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 208, 104877, 2021.

GARBELINI, L. G.; DEBIASI, H.; BALBINOT JR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; COELHO, A. E.; TELLES, T. S. Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems. **European Journal of Agronomy**, v. 137, 126528, 2022.

GARBELINI, L. G.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JR, A. A.; BETIOLI JR, E.; TELLES, T. S. Profitability of soybean production models with diversified crops in the autumn-winter. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 4092-4103, 2020.

HIVELY, W. D.; LAMB, B. T.; DAUGHTRY, C. S. T.; SHERMEYER, J.; McCARTY, G. M.; QUEMADA, M. Mapping crop residue and tillage intensity using worldview-3 satellite shortwave infrared residue indices. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, 1657, 2018. 22 p.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata/. Acesso em: 3 out. 2023.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. **SisCob**: manual de utilização. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 18 p.

LAL, R. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 1-3, 2007.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral das plantas**. São Paulo-SP : Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MERTEN, G. H.; ARAÚJO, A. G.; BISCAIA, R. C. M.; BARBOSA, G. M. C.; CONTE, O. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 152, p. 85-93, 2015.

MONTEIRO, R. C.; FRANCHINI, J. C.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Soil nitrous oxide emissions from a soybean-wheat succession under different tillage systems in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0220135, 2023.

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.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.200, 104611, 2020. 14 p.

MORRISON, J. E.; HUANG, C.; LIGHTLE, D. T.; DAUGHTRY, C. S. T. Residue cover measurement techniques. **Journal of Soil and Water Conservation,** v. 48, p. 478-483, 1993.

NIELSEN, K. F. Roots and root temperature. In: CARLSON, E. W. (ed). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. 691 p.

NITSCHE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina (PR): Instituto Agronômico do Paraná, 2019. 210 p.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 47-57, 1996.

ORTIGARA, C. **Propriedades físicas e hídricas de um Latossolo em diferentes sistemas de cultivo de longa duração**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen, Frederico Westphalen.

PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural. **Estimativa de safra**. 2023. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/system/files/publico/Safras/pss.xlsx. Acesso em: 3 out. 2023.

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).

RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7-16, 2018

RICHARDS, B. K.; WAFTER, M. F.; MUCK, R. E. Variation in line transect measurements of crop residue cover. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 39, p. 60-61, 1984.

SAPUCAY, M. J. L. 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.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 427-436, 2000.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The Soybean Yield Gap in Brazil - Magnitude, Causes and Possible Solutions for a Sustainable Production. **Journal of Agriculture Science**, v. 153, p. 1394-1411, 2015.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M. de. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 547-556, 2012.

SORIANI, R. **Índice de qualidade estrutural do solo e sua relação com atributos físicos de um Latossolo Vermelho**. 2020. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

TEDESCO, M. J.; BISSANI, C. A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas. In: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênesis, 2004. p. 75-92.

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. E-book. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 272).

TONON-DEBIASI, B. C.; DEBIASI, H.; RONDINA, A. B. L.; MORAES, M. T. de; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Microbial attributes as structural quality index for physical health of an Oxisol under compaction levels. **Soil and Tillage Research**, v. 235, 105872, 2024.

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.

VARELLA, C. A. A.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SENA JÚNIOR, D. Y. G. Determinação da cobertura do solo por análise de imagens e redes neurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 225-229, 2002.

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA
E PECUÁRIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO