

Diagnóstico físico e químico do solo em lavouras sob sistema plantio direto no Planalto Serrano de Santa Catarina e nos Campos de Cima da Serra do Rio Grande do Sul

André Julio do Amaral¹, José Eloir Denardin¹, Anderson Santi¹, Vanderlise Giongo¹ e Fabrício Jardim Hennigen²

Resumo – Este trabalho objetivou diagnosticar a ocorrência de limitações física e química em lavouras manejadas sob sistema plantio direto. O estudo foi conduzido a campo, em 12 talhões agrícolas em Latossolos, Nitossolos e Cambissolos com caráter aluminoso. Ao final do ciclo da cultura da soja foi realizada a amostragem do solo no terço superior, no terço médio e no terço inferior da toposequência, totalizando 36 pontos de coleta e cinco métodos de amostragem. Foram analisados a reação do solo (pH-H₂O), os teores de fósforo (P) e potássio (K) trocáveis e de matéria orgânica no solo (MO), a densidade do solo (Ds), o volume de poros totais (Pt), de macroporos (Ma) e de microporos (Mi), a taxa estável de infiltração de água no solo (Tei) e o índice de qualidade estrutural do solo (Iqes). A ocorrência de limitação química foi comprovada para o pH-H₂O, P e K em 70%, 92% e 75% dos talhões, respectivamente, evidenciada pelos métodos de amostragem de forma estratificada. Os teores de MO foram, em média, de 3,7g dm⁻³ na camada de 0-20cm. A ocorrência de limitação física foi evidenciada pelos valores de Ds e Ma. O Iqes, com oscilação de 0 a 5, foi, em média, de 3,6. Com base nos critérios estabelecidos constatou-se a presença de limitação química e/ou física em 11 talhões e a amostragem de 0-10cm e 10-20cm como eficaz em identificar a estratificação da fertilidade do solo em SPD.

Termos de indexação: Fertilidade do solo; Amostragem do solo; Compactação; Adensamento; Estratificação química.

Soil physical and chemical diagnosis in crops under no-tillage at Serrano Plateau of Santa Catarina and highlands of Rio Grande do Sul

Abstract – This study aimed to identify physical and chemical limitations in crops managed under a no-tillage system. The research was conducted on 12 farm plots with Oxisols, Nitossols, and Cambisols with an aluminum character. After the soybean cycle, soil sampling was done in the upper, middle, and lower third of the top sequence, totaling 36 points using five sampling methods. The study focused on soil pH, exchangeable phosphorus (P) and potassium (K) content, soil organic matter (OM), soil density (Ds), total pore volume (Pt), macropores (Ma), micropores (Mi), stable soil water infiltration rate (Tei), and index of soil structural quality (Iqes). Chemical limitations were found for pH, P, and K in 70%, 92%, and 75% of the plots, respectively. The organic matter content averaged 3.7g dm⁻³ in the 0-20cm layer. Physical limitations were evidenced by the values of Ds and Ma. The Iqes ranged from 0 to 5, with an average of 3.6. Chemical and/or physical limitations were found in 11 plots, and sampling of 0-10cm and 10-20cm effectively identified soil fertility stratification in the no-tillage system.

Index terms: Soil fertility; Soil sampling, Compaction; Densification; Chemical stratification.

Introdução

Em lavouras manejadas sob sistema de Plantio Direto (SPD), a calagem é, comumente, realizada em superfície, sem incorporação do calcário na camada de 0-0,2m de profundidade, enquanto a adubação das culturas é, frequentemente, realizada com deposição dos fertilizantes na profundidade de 0,03 – 0,07m (CAIRES *et al.*, 2000; Ciotta *et al.*, 2004; Spera *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2019; Bellinaso *et al.*, 2021). Os processos de semeadura e adubação praticados nestas lavouras mobilizam menos de 15% do volume de solo da camada de 0-0,2m de profundidade por hectare. Em decorrência, tanto o calcário quanto os adubos tendem a permanecer na camada superficial do solo, provocando estratificação dos indicadores químicos da fertilidade do solo, gerando assim duas camadas: uma superficial, em média, de 0-0,05m de profundidade, sem

acidez, com disponibilidade de nutrientes acima dos níveis de suficiência e alta concentração de raízes; outra subsuperficial, em média, de 0,05-0,20m de profundidade, com acidez, disponibilidade de nutrientes abaixo dos níveis de suficiência e escassez ou ausência de raízes (Sharpley *et al.*, 2001; Garcia *et al.*, 2007; Spera *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2019).

Em lavouras conduzidas sob PD, com aplicação de calcário em superfície, a

acidez, com disponibilidade de nutrientes acima dos níveis de suficiência e alta concentração de raízes; outra subsuperficial, em média, de 0,05-0,20m de profundidade, com acidez, disponibilidade de nutrientes abaixo dos níveis de suficiência e escassez ou ausência de raízes (Sharpley *et al.*, 2001; Garcia *et al.*, 2007; Spera *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2019).

Recebido em 01/11/2023. Aceito para publicação em 24/05/2024.

Editora de seção: Marlise Nara Ciotta

¹ Eng.-agr. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Rodovia BR 285, km 294 Caixa Postal 308199050-970, Passo Fundo, RS. E-mail: andre.amaral@embrapa.br, jose.denardin@embrapa.br, anderson.santi@embrapa.br, vanderlise.giongo@embrapa.br

² Eng.-agr. Gerente de Assistência Técnica da Cooperativa Regional Agropecuária de Campos Novos – Copercampos. Rodovia BR 282 - Km 342 - Nº 23, Bairro Boa Vista - Caixa Postal 161 CEP 89620-000, Campos Novos, SC. E-mail: fabricio.hennigen@copercampos.com.br

ocorrência de limitações físicas do solo, tais como compactação e adensamento, é recorrente, em especial nos solos constituídos por argila do tipo caulinita (Nunes *et al.*, 2019). A compactação e o adensamento restringem os fluxos de água, gases e nutrientes no perfil do solo e aumentam o fluxo de calor e a resistência à penetração de raízes, comprometendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Beutler *et al.*, 2005; Franchini *et al.*, 2017; Spera *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2019; Debiasi *et al.*, 2022).

De acordo com Sentelhas *et al.* (2015), a mesorregião do Planalto Serrano de Santa Catarina e a região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra do Rio Grande do Sul, áreas de interesse do presente estudo, reúnem condições de solo e clima capazes de maximizar a produtividade e a rentabilidade de sistemas de produção que integram culturas anuais. Porém, requerem boas práticas de manejo de solo e de culturas, com destaque para a correção dos indicadores químicos da fertilidade do solo referentes à elevada acidez e à baixa disponibilidade de nutrientes. Assim, o uso de técnicas de amostragem em camadas estratificadas do solo, incluindo a camada de 0,10-0,20m do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, se reveste de importância para fins de diagnosticar a presença de limitação física ou química da fertilidade do solo e indicar estratégias de manejo para correção (Spera *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2019; Bellinaso *et al.*, 2021).

O objetivo deste estudo foi definir métodos e critérios para diagnosticar a estratificação de indicadores químicos e físicos da fertilidade do solo na camada de 0-20cm, como suporte à tomada de decisão para corrigi-los, com o intuito de maximizar a produtividade dos sistemas de produção de espécies anuais manejados sob SPD e garantir os benefícios econômicos, sociais e ambientais preconizados pela aplicação dos preceitos do conservacionismo que regem a agricultura.

Material e métodos

Este estudo foi implementado em

12 talhões de lavouras na Mesorregião Planalto Serrano de Santa Catarina e Região Fisiográfica Campos de Cima da Serra do Rio Grande do Sul, pertencentes a produtores rurais associados à Cooperativa Regional Agropecuária de Campos Novos (Copercampos) e distribuídos em quatro polos de produção por ela estabelecidos (Tabela 1).

A classificação climática, conforme Köppen, é do tipo clima temperado quente (Cfb), com temperaturas média mínima de 13°C, média máxima de 23°C e média anual de 18°C, e com precipitação anual de 1.600mm a 1.920mm, sem nenhuma estação seca definida (Wrege *et al.*, 2012).

Os 12 talhões foram caracterizados, conforme Santos *et al.* (2018), quanto à classificação taxonômica dos solos até o quarto nível categórico; ao relevo; à altitude; à profundidade do perfil; ao teor de argila; à classe textural; à $CTC_{pH7,0}$; e ao teor de matéria orgânica (Tabela 1).

A calagem, a adubação corretiva e a adubação de manutenção foram realizadas nos talhões conforme laudos de amostras de solo de 0-20cm de profundidade, e as doses definidas com base nas indicações técnicas da CQFS RS/SC (2016), porém, sem incorporação dos fertilizantes no solo.

Ao final do ciclo da cultura da soja ocorrido nos meses de março e abril de 2023, foi realizada a amostragem em cada um dos 12 talhões em três pontos: terço superior, terço médio e terço inferior da topossequência, totalizando 36 pontos de coleta. Em cada um dos pontos georreferenciados, foram abertas minitrincheiras com as dimensões de 50cm x 50cm x 50cm (Spera *et al.*, 2018). Empregaram-se cinco métodos de amostragem: M1 - camadas de 5 em 5cm, até 20cm de profundidade; M2 - camada com estrutura granular 0-6cm e na camada com estrutura adensada 6-20cm; M3 - camadas de 0-10cm e 10-20cm; M4 - camada de 0-20cm; e M5 - camada de 0-10cm. As amostras de solo foram coletadas diretamente sobre monólitos de solo extraídos das paredes das minitrincheiras com o auxílio de pá-de-corte e enviadas ao laboratório para análises químicas, conforme Teixeira *et al.* (2017).

Os indicadores químicos foram aqueles que tiveram ou não necessidade de calagem e de adubação corretiva do solo (CQFS RS/SC, 2016), ou seja, pH em água e teores de fósforo (P) e potássio (K). Os níveis críticos foram aqueles citados em CQFS RS/SC (2016): pH inferior a 5,5; teores de P inferiores a 9mg dm⁻³, 12mg dm⁻³, 18mg dm⁻³ e 30mg dm⁻³, respectivamente, para as classes de textura, classe 1: > 600g kg⁻¹, 2: 600 a 410g kg⁻¹, 3: 400 a 210g kg⁻¹ e 4: ≤200g kg⁻¹ e teores de K inferiores a 120mg dm⁻³, correspondentes a $CTC_{pH7,0}$ na faixa de 15,1cmol_c dm⁻³ a 30cmol_c dm⁻³.

A interpretação foi embasada nos seguintes critérios: a distribuição do pH, P e K foi considerada estratificada quando seus valores foram iguais ou superiores aos seus níveis críticos em uma das camadas amostradas e inferiores aos seus níveis críticos na outra camada; Portanto, para fins de diagnóstico, considerou-se que há limitação química ao desenvolvimento das plantas quando pelo menos um dos indicadores químicos da fertilidade do solo se encontrava estratificado.

Os indicadores físicos da fertilidade do solo selecionados foram: densidade do solo (Ds); densidade máxima do solo ($Ds_{máx}$); densidade relativa (Ds_{rel}); porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), Índice de Qualidade Estrutural do Solo (Iqes); e taxa estável de infiltração de água no solo (Tei).

As zonas de transição e a espessura das camadas de solo nas minitrincheiras foram identificadas via avaliações sensoriais, observando-se a variação da resistência do solo ao toque com instrumento pontiagudo e o formato e a distribuição das raízes das plantas, com atenção a variações bruscas da arquitetura e distribuição das raízes. A seguir, as camadas identificadas foram amostradas com anéis volumétricos de 75 cm³, para a determinação da Ds, Pt, Ma e Mi, conforme descrito em Teixeira *et al.* (2017). A $Ds_{máx}$ foi estimada pela função de pedotransferência obtida por Marcolin & Klein (2011):

$$D_{s_{\text{máx}}} = 2,03133855 \\ - 0,00320878 \text{ MO} - \\ 0,00076508 \text{ argila} \quad (1)$$

Sendo: $D_{s_{\text{máx}}}$ a densidade máxima do solo em kg dm^{-3} ; MO o teor de matéria orgânica do solo em g kg^{-1} ; e Argila o teor de argila do solo em g kg^{-1} .

A densidade relativa ($D_{s_{\text{rel}}}$), que indica o índice de adensamento do solo, foi estimada pela relação:

$$D_{s_{\text{rel}}} = D_s \div D_{s_{\text{máx}}}$$

Sendo: D_s a densidade do solo na camada avaliada em kg dm^{-3} ; e $D_{s_{\text{máx}}}$ a densidade máxima do solo estimada em kg dm^{-3} .

O Iqes foi avaliado por meio do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (Ralisch *et al.*, 2017). A Tei foi avaliada em três pontos representativos de cada talhão, empregando-se o Infiltrômetro de Cornell e procedimentos descritos em Seratto *et al.*, (2019). Os níveis críticos, para Pt, Ma e Mi, foram estipulados, respectivamente, em $0,55\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,10\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,37\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Stone e Silveira, 2001; Bertol *et al.*, 2004; Beutler *et al.*, 2005; Marcolin e Klein, 2011). O nível crítico, para Tei, foi estipulado em 50mm h^{-1} (Back e Wildner, 2022) e, para Iqes, a nota 4 (Ralisch *et al.*, 2017). O nível crítico, para o indicador $D_{s_{\text{rel}}}$, foi estipulado em 0,85 (Marcolin e Klein, 2011).

A interpretação dos indicadores físicos da fertilidade do solo foi embasada nos seguintes critérios: o indicador D_s foi considerado limitante quando seu valor foi igual ou superior ao seu nível crítico em, pelo menos, uma das camadas avaliadas; os indicadores Pt, Ma e Mi foram considerados limitantes quando seus valores foram iguais ou inferiores aos seus níveis críticos em, pelo menos, uma das camadas avaliadas; o Iqes e a Tei foram considerados limitantes quando seus valores foram iguais ou inferiores ao seu nível crítico.

Os resultados envolvendo o diagnóstico químico e físico da fertilidade do solo nos 12 talhões agrícolas foram submetidos à análise estatística descritiva e as médias foram comparadas ao nível crítico de cada indicador químico

e físico da fertilidade do solo, utilizando o intervalo de confiança (IC) ao nível de significância de $p < 0,05$ como parâmetro, sendo representados de forma gráfica (Masson e Loftus, 2003):

$$\text{IC } 95\% = M \pm Z_c \frac{\delta}{\sqrt{n}}$$

Sendo: M o valor médio do parâmetro avaliado; Z_c o nível de confiança 95%; δ o desvio-padrão; n o número de observações.

Resultados e discussão

Métodos de amostragem do solo

Considerando os níveis críticos dos indicadores químicos da fertilidade do solo (pH, P e K) definidos pela CQFS RS/SC (2016), todos os métodos de amostragem indicaram necessidade de correção química do solo (Figura S1). Porém, ao considerar os critérios definidos para este estudo associados ao nível crítico dos indicadores pH, P e K às diferentes camadas amostradas pelos métodos M1, M2 e M3, constatou-se que estes três métodos, além de evidenciarem a necessidade de correção química do solo em maior frequência do que os métodos M4 e M5, revelaram estratificações destes indicadores no perfil de 0-20cm já percebidas por Sharpley *et al.* (2001), Garcia *et al.* (2007), Spera *et al.* (2018) e Nunes *et al.* (2019).

Os métodos M1, M2 e M3, ao detectarem estratificações de pH, P e K ao longo do perfil de 0 a 20cm de profundidade, são, por esta razão, avaliados como métodos mais precisos do que os métodos M4 e M5, indicados pela SBCS (2016), para a amostragem de solo em talhões submetidos a manejos conservacionistas sem mobilização intensa do solo. Enfatiza-se que, em termos médios, os métodos M1, M2 e M3 revelaram necessidade de correção dos indicadores químicos da fertilidade do solo, respectivamente, em 81%, 78% e 78% dos talhões amostrados, contra apenas 42% e 28% dos talhões amostrados pelos métodos M4 e M5, respectivamente. Com esses dados, infere-se que o método M3, que coleta amostras de solo

nas camadas de 0-10cm e 10-20cm, por sua maior praticidade operacional em relação aos métodos M1 e M2, se consolidou como padrão a ser empregado na avaliação da distribuição dos indicadores químicos da fertilidade do solo, em áreas manejadas sob sistema plantio direto, sobretudo por ser corroborada como um dos métodos recomendados pela CQFS RS/SC (2016) para o monitoramento da fertilidade do solo.

Indicadores físicos da fertilidade do solo – IFFS

Os valores de D_s da camada com estrutura granular, situada, em média, de 0-6cm de profundidade, se mostraram sempre inferiores àqueles das camadas mais profundas, situadas, em média, de 6-20cm e de 20-35cm (Figura S2a). Na camada com estrutura granular, os valores de D_s variaram de 0,7 a $1,22\text{kg dm}^{-3}$ e, na camada adensada, situada, em média de 6-20cm, os valores variaram 1,13 a $1,41\text{kg dm}^{-3}$, sendo que 18% das amostras (7 casos) estão com valores entre 1,32 e $1,41\text{kg dm}^{-3}$. Na camada com estrutura preservada, 20-35cm, os valores de D_s variaram de 1,03 a $1,27\text{kg dm}^{-3}$. Estes resultados são associados aos maiores teores de MO na camada de 0-6cm do solo, resultando em agregados leves, porosos e de estrutura granular, concordando com Tormena *et al.* (2023), que encontraram redução dos valores de D_s com o aumento dos teores de MO, para vários solos na região dos Campos Gerais, no Paraná. Na camada de 6 a 20cm, houve aumento da D_s (Figura S2a). Isto se deve, possivelmente, ao tráfego de máquinas com solo úmido e a aplicação de calcário em superfície. Resultados semelhantes foram obtidos por Spera *et al.* (2018) e Nunes *et al.* (2019), em Latossolos do Cerrado e do Sul do Brasil. Os valores de D_s na camada de 0-35cm foram menores ($p < 0,05$) do que a densidade máxima do solo e apresentaram grau de compactação $< 0,85$, valor considerado crítico (Figura S2a, b). Isto indica, a princípio, que não há problema de ordem física limitante ao crescimento e desenvolvimento radicular das plantas, nas condições deste estudo.

Tabela 1. Caracterização dos talhões agrícolas estudados com o objetivo de diagnosticar a fertilidade de solos manejados sob Sistema de Plantao Direto e culturas utilizadas nas safras 2020/2021; 2021/2022 e 2022/2023 no Planalto Serrano de Santa Catarina e nos Campos de Cima da Serra do Rio Grande do Sul

Table 1. Characterization of plots in order to diagnose soil fertility under no tillage and crops used in the 2020/2021; 2021/2022 and 2022/2023 in the Serrano Planalto of Santa Catarina and in the highlands of the Rio Grande do Sul

| Polo de produção | Talhão | Município/UF | Tipo Solo | ⁴ Manejo do solo | Declividade (%) | Altitude do talhão (m) | Profundidade do perfil (cm) | ¹ Teor de Argila (g kg ⁻¹) | ^{1,2} Classe textural | ^{1,3} CTC _{pH7,0} (cmol _c dm ⁻³) | ¹ MO (%) |
|------------------|--------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|---|---------------------|
| I | 1 | Barracão, RS | Latossolo Vermelho aluminíco típico | S/T; S/Avbr; S/T | 4 | 780 | >250 | 510 | 2 | 21 | 34 |
| | 2 | Barracão, RS | Latossolo Vermelho aluminíco típico | S/Avpr; S/Avpr; S/Avpr | 3 | 830 | >250 | 610 | 2 | 16 | 38 |
| | 3 | São José do Ouro, RS | Latossolo Vermelho aluminíco típico | S/Avpr; S/Avbr; S/T | 9 | 785 | >250 | 500 | 2 | 14 | 34 |
| II | 4 | Zortéa, SC | Cambissolo Háptico aluminíco típico | S/Avpr; S/T; S/Avpr | 9 | 792 | 60 a 150 | 570 | 2 | 22 | 36 |
| | 5 | Campos Novos, SC | Nitossolo Vermelho aluminíco típico | S/Avpr; S/Avbr; S/T | 6 | 857 | >150 | 580 | 2 | 13 | 36 |
| | 6 | Campos Novos, SC | Latossolo Bruno aluminíco típico | S/Avpr; S/er+Av; Mi/Milt/T | 7 | 838 | >150 | 430 | 2 | 15 | 37 |
| III | 7 | Brunópolis, SC | Latossolo Bruno aluminíco típico | S/Avucr; S/Avucr; S/avucr | 10 | 900 | >150 | 480 | 2 | 27 | 36 |
| | 8 | Brunópolis, SC | Latossolo Bruno aluminíco típico | Mi/avucr; S/avucr; S/avucr | 5 | 860 | >150 | 530 | 2 | 19 | 35 |
| | 9 | Curitibanos, SC | Nitossolo Bruno aluminíco húmico | S/avucr; S/avucr; Mi/avpr+er+nab | 5 | 930 | >150 | 420 | 2 | 25 | 43 |
| IV | 10 | Cerro Negro, SC | Cambissolo Húmico aluminíco léptico | S/Av+Az; S/Av+Az; S/Av+AZ | 7 | 1016 | 60 a 150 | 510 | 2 | 22 | 43 |
| | 11 | Cerro Negro, SC | Cambissolo Háptico aluminíco léptico | S/avpr; S/avpr; S/avpr | 8 | 1003 | 60 a 150 | 600 | 2 | 19 | 32 |
| | 12 | Campo Belo do Sul, SC | Nitossolo Vermelho aluminíco | S/er; Mi/avpr; S/er | 6 | 834 | >150 | 630 | 1 | 16 | 44 |

¹Valores médios da camada de 0-20cm do solo; ²Teores de argila: classe 1 > 600g kg⁻¹, nível crítico para fósforo = 9mg dm⁻³; classe 2 = 600 a 410g kg⁻¹, nível crítico para fósforo = 12 mg dm⁻³; classe 3 = 400 a 210 g kg⁻¹, nível crítico para fósforo = 18 mg dm⁻³; classe 4 = ≤200 g kg⁻¹, nível crítico para fósforo = 30mg dm⁻³. ³Nível crítico para K no solo = 60mg dm⁻³ para CTC_{pH7,0} ≤7,5cmol_c dm⁻³; Nível crítico para K no solo = 90mg dm⁻³ para CTC_{pH7,0} 7,6 a 15cmol_c dm⁻³; Nível crítico para K no solo = 120mg dm⁻³ para CTC_{pH7,0} 15,1 a 30cmol_c dm⁻³; e Nível crítico para K no solo = 135mg dm⁻³ para CTC_{pH7,0} ≥30cmol_c dm⁻³. Critérios estabelecidos conforme Manual de calagem e adubação para os estados do RS e SC (SBCS, 2016); ⁴S=Soja; Avbr= aveia branca; T= trigo; Avpr=Aveia preta; er= ervilhaca; Mi= milho; Milt= milheto; avucr= aveia ucraniana; Av+Az=aveia + avevém (pastejo). ⁵Average values of the 0-20cm soil layer; ²Clay content: class 1 > 600g kg⁻¹, critical level for phosphorus = 9mg dm⁻³; class 2 = 600 to 410g kg⁻¹, critical level for phosphorus = 12 mg dm⁻³; class 3 = 400 to 210 g kg⁻¹, critical level for phosphorus = 18 mg dm⁻³; class 4 = ≤200 g kg⁻¹, critical level for phosphorus = 30mg dm⁻³. ³Critical level for K in soil = 60mg dm⁻³ for CTCpH7.0 ≤7.5cmolc dm⁻³; Critical level for K in the soil = 90mg dm⁻³ for CTCpH7.0 7.6 to 15cmolc dm⁻³; Critical level for K in soil = 120mg dm⁻³ for CTCpH7.0 15.1 to 30cmolc dm⁻³; and Critical level for K in soil = 135mg dm⁻³ for CTCpH7.0 ≥30cmolc dm⁻³. Criteria established according to the Manual of liming and fertilization for the states of RS and SC (SBCS, 2016); ⁴S=Soy; Avbr= white oats; T= wheat; Avpr=Black oats; er= vetch; Mi= corn; Milt= millet; avucr= Ukrainian oats; Av+Az=oats + ryegrass (grazing).

De forma similar ao observado para a Ds (Figura S2), constata-se que a Pt apresentou um gradiente da camada superficial para camadas mais profundas do solo. A Pt foi maior do que o nível crítico ($P_t=0,55$) $p < 0,05$, na camada com estrutura granular e teve seu valor reduzido em profundidade, porém, sem diferir do nível crítico (Figura S3a).

Constata-se que os valores de Ma foram maiores ($p < 0,05$) do que valor crítico ($0,1 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) na camada com estrutura granular (0-6cm) e menores do que o valor crítico ($p < 0,05$) nas camadas adensada (6-20cm) e com estrutura preservada (20-35cm), (figura S3b). Isto indica que ocorre estratificação dos valores de Ma, o que poderia limitar o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas em uma condição de déficit hídrico (Franchini *et al.*, 2017; Debiase *et al.*, 2022). Marcolan *et al.* (2007) e Bertol *et al.* (2004) também encontraram valores de Ma menores do que $0,1 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ em subsuperfície, em áreas de sistema plantio direto, em um Argissolo Vermelho distrófico típico, no Rio Grande do Sul e em um Cambissolo Húmico aluminico, em Santa Catarina. Os autores apontam que o fornecimento de oxigênio às raízes depende de vários fatores, incluindo tortuosidade, continuidade e distância entre poros.

Constata-se que em todas as situações avaliadas o volume de Mi ficou acima do nível crítico de $0,37 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, ou seja, não há limitação em relação à retenção de água (Figura 3c), resultados semelhantes foram observados por Bertol *et al.* (2004), em um Cambissolo Húmico aluminico, sob sistema plantio direto de longo prazo. No entanto, a disponibilidade de água pode ser afetada em função do predomínio de criptoporos na composição da microporosidade do solo. Isto aumenta o conteúdo de água no ponto de murcha permanente, reduzindo a faixa de água prontamente disponível para as plantas. Nestes casos, em anos com distribuição irregular das chuvas durante o ciclo das culturas, a ocorrência de déficit hídrico pode se tornar intensa, provocando redução no rendimento das culturas.

Os valores de Tei ($n=12$) variaram de 32 a 100 mm h^{-1} e, com valores médios

de 70, 56, 75 e 77 mm h^{-1} , para os polos de produção I, II, III e IV, respectivamente (Figura S4a). Ambos os valores acima de 50 mm h^{-1} , considerado como sendo o nível crítico ideal para manter a água no solo e na lavoura (Back e Wildner, 2022).

Os menores valores de Tei no Polo de produção II podem estar associados à baixa diversificação de culturas nos talhões 4 e 5 e ao pisoteio animal no talhão 6, referente ao sistema integração lavoura pecuária (Tabela 1).

Estes resultados são similares aos encontrados por Barcelos *et al.* (1999) e Debiase *et al.* (2022), em Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, no Planalto Norte do RS e do PR, sob sistema plantio direto. Os autores enfatizam a necessidade da presença nas lavouras de estruturas de contenção do escoamento superficial (tais como terraços), especialmente naquelas que apresentam condições para que o escoamento superficial adquira velocidade.

O índice de qualidade estrutural do solo (Iqes) (Figura S4b), avaliado pela metodologia do DRES, variou de 3.2 a 4.1 nos polos de produção I a IV. Os valores de Iqes encontrados nos talhões dos polos de produção I e II foram de 3.7 e 3.2, respectivamente. Nos polos de produção III e IV, os valores de Iqes foram de 4.1, em ambos os locais (Figura S5). Ralish *et al.* (2017) apontam que valores de Iqes na faixa de 3.0 a 3.9 são classificados como de qualidade estrutural regular e na faixa de 4.0 a 4.9 como sendo de boa qualidade estrutural. As recomendações para melhoria do Iqes nos polos de produção I e II se referem ao aprimoramento do sistema de produção, ampliando a diversificação de culturas, incluindo espécies vegetais com alto aporte de fitomassa aérea e de raízes, com destaque para as gramíneas de verão, em um sistema de rotação, sucessão e/ou de consorciação de culturas.

Indicadores químicos da fertilidade do solo – IQFS

Os valores de $\text{pH-H}_2\text{O}$ diferiram significativamente ($p < 0,05$) do nível crítico (NC) ($\text{pH-H}_2\text{O} = 5,5$), na camada de

0-20cm, com redução dos valores em profundidade. Em média foram maiores do que o NC ($p < 0,05$) na camada de 0-5cm do solo, iguais ao NC na camada de 5-10cm ($p > 0,05$) e menores ($p < 0,05$) do que o NC, nas camadas de 10-15cm e 15-20cm e camadas inferiores até 40cm do solo. Este resultado evidencia a estratificação deste indicador químico da fertilidade do solo em áreas manejadas sob plantio direto nas condições deste estudo (Figura S5a).

A estratificação de $\text{pH-H}_2\text{O}$ observada pode ser atribuída ao modo de aplicação de calcário (em superfície sem incorporação), ocorrendo com frequência menor do que 5 anos, e, ao modelo de produção vigente, baseado no cultivo de soja no verão e pastagem de aveia + azevém no inverno, o que condiciona baixo aporte de fitomassa ao solo, bem como, pelo tipo de solo, em geral de textura argilosa com presença de caráter aluminico e elevados teores de matéria orgânica (Tabela 1). Resultados semelhantes foram observados por Spera *et al.* (2018) e Nunes *et al.* (2019), em áreas sob sistema plantio direto, em condições semelhantes à do presente estudo.

Em relação aos teores de K^+ , observava-se que os valores foram maiores do que o NC (120 mg dm^{-3}) ($p < 0,05$) na camada de 0-5cm, iguais ao NC ($p > 0,05$) nas camadas de 5-10cm e 10-15cm e menores do que o NC ($p < 0,05$) na camada de 15-20cm, permanecendo menores do que o NC ($p < 0,05$) com redução dos teores em profundidade na camada de 20-40cm na (Figura S5b). Portanto, houve estratificação de K^+ no perfil de solo.

Valores de K^+ inferiores ao nível crítico na camada superficial do solo podem limitar o rendimento das culturas. Sousa & Lobato (1996) identificaram um incremento de $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ no rendimento de soja com a elevação dos níveis de K^+ no solo, na camada de 0-20cm, em um Latossolo Vermelho distroférrico argiloso do Cerrado Brasileiro. Esse aumento foi obtido com a adição de 100 kg ha^{-1} de K_2O , gerando uma relação de 8,4kg de grãos de soja para cada quilo de K_2O

aplicado. Os valores de K^+ em média ($n=36$) encontram-se em níveis adequados (maiores ou igual ao NC), somente na camada de 0-10cm, com valores inferiores ao NC na camada de 10-20cm. Nos anos cujo o regime de chuvas é regular, esta condição pode satisfazer a necessidade da cultura, porém, em anos com déficit hídrico, as perdas de rendimento podem ser acentuadas.

A distribuição dos teores de P na camada de 0-40cm do solo, foi muito similar aos de K^+ , ou seja, os teores de P foram maiores ($p<0,05$) do que o NC (12mg dm^{-3}), na camada de 0-5cm, iguais ao NC ($p>0,05$) nas camadas de 5-10cm e 10-15cm e menores do que o NC ($p<0,05$) na camada de 15-20cm (Figura S5c). Isto evidencia a necessidade de correção dos níveis de P, até atingir pelo menos 20cm de profundidade do solo. Além disso, chama a atenção o risco de transferência de P para mananciais de água, via escoamento superficial em função da baixa mobilidade deste elemento no solo e dos elevados teores na camada superficial. Estes resultados corroboram os observados por Garcia *et al.* (2007), que apontam que a estratificação de nutrientes no perfil de solos sob SPD é comum, com os nutrientes se concentrando na camada de 0-5cm de profundidade do solo, especialmente P e K, devido à menor mobilização do solo. Os valores de MO foram altos na camada de 0-5cm e médios na camada de 5-20cm (Figura S5d), conforme critérios estabelecidos em (CQFS RS/SC, 2016). Em praticamente todas as situações, os valores médios de MO no solo foram iguais ou superiores ao nível crítico (3% de MO), na camada de 0-20cm, caracterizando apenas gradientes de concentração (Figura S5d). Elevados teores de MO são características típicas dos solos da região de estudo, sendo condicionados pelo clima frio e por altitudes acima de 800m (Tabela 1). As estratificações de P, K e pH em SPD podem afetar o desempenho das culturas, especialmente quando ocorrem estiagens ou déficit hídrico durante a estação de crescimento na fase de florescimento e enchimento de grãos (Spera *et al.*, 2018, Sentelhas

et al., 2015, Bellinaso *et al.*, 2021).

De acordo com Bellinaso *et al.* (2021), a estratificação e a baixa disponibilidade de P em profundidade do solo resultaram em redução no rendimento de grãos de soja em um Argissolo Vermelho distrófico arênico da Depressão Central do RS. Os autores reforçam a necessidade de se realizar amostragem estratificada em áreas de sistema plantio direto consolidado, considerando a camada de 10-20cm do solo para a tomada de decisão quanto à necessidade de incorporação de calcário, P e K na camada de 0-20cm do solo, conforme (CQFS RS/SC, 2016). O rendimento médio nas últimas três safras (20/21; 21/22 e 22/23) de grãos de soja nas áreas de estudo foi da ordem de 60; 71; 62 e 61sc ha^{-1} para os polos de produção I, II, III e IV (informação pessoal), respectivamente. De acordo com os resultados obtidos no diagnóstico físico e químico, sugere-se: quando necessário, reiniciar o SPD com a correção das limitações físicas e químicas nos talhões; incorporar corretivos e adubos na camada de 0-20cm de profundidade; semear gramínea de verão de forma isolada ou em consórcio com cereal de inverno, logo após a incorporação dos corretivos e fertilizantes; redesenhar o modelo de produção, associando às espécies geradoras de renda plantas de serviço no outono, no inverno ou no outono-inverno; intensificar a diversificação de culturas, incluindo espécies com funções pré-definidas: criação e estabilização estrutural do solo; fixação biológica de nitrogênio; ciclagem e reciclagem de nutrientes; prevenção de pragas (insetos, doenças e plantas daninhas); mínimo revolvimento do solo, cobertura permanente e aporte contínuo de matéria orgânica ao solo via palha e raízes.

Conclusões

O diagnóstico físico do solo identificou a presença de duas camadas distintas: uma com estrutura granular de condições físicas adequadas em média de 0-0,06m do solo; outra de maior densidade em média de 0,06-0,20m do

solo, com porosidade total reduzida e, em geral, com volume de macroporos menores do que $0,1\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$.

A limitação de ordem química foi caracterizada pela estratificação dos teores de P, K e pH no solo e ocorreu com maior frequência do que a limitação física.

O método de amostragem M3, que considera amostras entre as camadas de 0-10cm e 10-20cm, foi eficaz em detectar a presença de estratificação de indicadores químicos da fertilidade do solo.

Agradecimentos

Aos produtores associados e aos técnicos de campo da Cooperativa Regional Agropecuária de Campos Novos – Copercampos, pelo acesso às áreas e apoio logístico para a caracterização e amostragem de solo nos talhões, aos técnicos da Embrapa Darci Luiz Veronese, Telles Dall Agnol e Cristiano Albino Tomasi, pelo apoio nos trabalhos de campo e de laboratório. Trabalho executado com recursos do contrato N° 21100.22/0108-0 de Cooperação Técnica e financeira entre Embrapa e Copercampos.

Referências

- BACK, A.; WILDNER, L. P. **HidroTerraço 1.0 – Programa para cálculos hidrológicos e dimensionamento de estruturas de conservação do solo e da água em áreas agrícolas**. Florianópolis: Epagri, 124p., 2022. (Epagri, Documentos, 348).
- BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.35-43, 1999.
- BELLINASSO, R.J.S.; TIECHER, T.; VARGAS, J.P.R.; RHEINHEIMER, D.S. Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. **Soil Research**, p. 1-17, 2021.

- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JÚNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.155-163, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.6, p.843-849, 2005.
- CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.161-169, 2000.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.317-326, 2004.
- CQFS RS/SC. SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS). **Manual de Adubação e de calagem para os Estados do rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul: Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 316p.
- 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. 137p. (Embrapa Soja. Documentos, 447).
- FRANCHINI, J.C.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; Debiasi, H.; NEPOMUCENO, A.L. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, v.38, p.715-724, 2017.
- GARCIA, J.P.; WORTMANN, C.S.; MAMO, M.; DRUIBER, R.; TARKALSON, D. One-
Time Tillage of No-Till: Effects on Nutrients, Mycorrhizae, and Phosphorus Uptake. **Agronomy Journal**, v.99, n.4, p.1093-1103, 2007.
- MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I.; FRAGA, T.I.; LEITE, J.G.D. Recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.571-579, 2007.
- MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.2, p. 349-354, 2011.
- MASSON, M.E.J.; LOFTUS, G.R. Using confidence intervals for graphically based data interpretation. **Canadian Journal of Experimental Psychology**, v.57, p.203-220, 2003.
- NUNES, M.R.; DENARDIN, J.E.; VAZ, C.M.P, KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C.A. Lime movement through highly weathered soil profiles. **Environmental Research Communications**, 2019.
- 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. 63p. 2017. (Embrapa Soja, Documentos, 390).
- SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C. dos, OLIVEIRA, V.A. de, LUMBRE-RAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A. de, ARAÚJO FILHO, J.C. de, OLIVEIRA, J.B. de; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa. 2018. 356 p.
- SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J.R.B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, Camb., p.1-18. 2015.
- SERATTO, C.D.; Franchini, J.C.; SERATTO, F.R.; DEBIASE, H.; SANTOS, E.L.; CONTE, O.; MORALES NETO, S.; BRISCHILIARI, V. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Embrapa Soja. 67p. 2019. (Embrapa Soja. Documentos, 424).
- SHARPLEY, A.N.; MCDOWELL, R.W.; KLEINMAN, P.J.P Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. **Plant and Soil**, v.237, n.287-307, 2001.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. **Correção do solo e adubação da cultura da soja**. Planaltina, Embrapa. 30p. 1996. (Embrapa. CPAC. Circular técnica, 33).
- Spera, S.T., MAGALHÃES, C.A.d.S., DENARDIN, J.E., ZOLIN, C.A., MATOS, E. d. S., SOUZA, L.G.A.D.; SHIRATSUCHI, L.S. **Estratificação química e física em solos manejados com sistema plantio direto em mato grosso - entraves à produção das culturas**. Embrapa, Sinop, MT: 2018. (Embrapa. Documentos, n. 7).
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.395-401, 2001.
- TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.; K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017. 573p.
- TORMENA, C.A.; SÁ, J.C.M.; FIGUEIREDO, G.C.; SEVERIANO, E.C.; GUIMARÃES, R.M.L.; LIMA, R.P. Relações da matéria orgânica com atributos físicos de solos de regiões subtropicais e tropicais brasileiras. *In: Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical*. BETTIOL, W.; SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C.A. de. (Ed.). Brasília: Embrapa, 2023. p.85-125.
- WREGGE, M. C.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIO, C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e do Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Embrapa, 2012.