

PREPARO CONVENCIONAL CONVERTIDO PARA SEMEADURA DIRETA:

EFEITOS NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E NO MILHO

CONVERSION FROM CONVENTIONAL TILLAGE TO NO-TILLAGE: EFFECTS ON

SOIL CHEMICAL PROPERTIES AND CORN PRODUCTION

Conversão de manejo do solo

Ben-Hur Natal Dal Piva 1 *, Ildegardis Bertol 1, Davi Ney Santos 1, Davi Ney Santos 1, Gilmar Luiz Mumbach 1, Artur Kauling 1, Marco Frühauf de Oliveira 1

1 Universidade do Estado de Santa Catarina. Brasil

* Autor de contacto: benhulpiva059@hotmail.com

RESUMO

Com a pesquisa objetivou-se avaliar as modificações nos atributos químicos do solo e o efeito disso no desempenho dos atributos agronômicos do milho, após converter o manejo conduzido como preparo convencional para a forma de semeadura direta, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico. A pesquisa foi conduzida em um experimento onde o preparo convencional (PC) e a semeadura direta (SD) vinham sendo estudados há 20. Após a conversão de manejo, a SD foi mantida e denominada semeadura direta consolidada (SDc) e o PC foi convertido à SD a qual foi denominada

semeadura direta implantada (SDi). Determinou-se pH em água, alumínio, potássio, cálcio e magnésio trocável, fósforo extraível e carbono orgânico total (COT), antes e ao final de 30 meses da conversão de manejo. Ao final da pesquisa avaliou-se também os atributos agronômicos do milho cultivado na SDi e SDc. Ao final da pesquisa, a SDi propiciou aumento do alumínio e potássio trocável e do COT, e diminuição do pH e do Ca, em comparação ao início da pesquisa. Maior massa da parte aérea e raízes e produtividade de grãos de milho foi observada na SDc em comparação a SDi.

Palavras-chave: manejo do solo, conservação do solo, produtividade do milho.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the changes in the soil chemical attributes and their effects on the agronomic attributes of corn, after conversion from conventional tillage (PC) to no-tillage (SD), in a Inceptisol soil (Cambissolo Húmico alumínico léptico). In an experiment where PC and SD effects had been studied for 20 yr, main plots under PC were converted to SD and referred to as implemented SD (SDi) while plots under SD remained unaltered and were referred to as consolidated NT (SDc). The pH in water, exchangeable aluminum, potassium, calcium, and magnesium, extractable phosphorus, and total organic carbon (COT), were determined at the beginning of the experiment and after a 30-month period. The agronomic attributes of corn grown under SDi and SDc were also evaluated. At the end of the experiment, plots under SDi evidenced an increase in exchangeable aluminum and potassium and COT, and a decrease in pH and exchangeable calcium. Corn biomass accumulation in shoots and roots increased and higher grain yields were observed under SDc compared to SDi.

Keywords: soil management, soil conservation, corn production.

INTRODUÇÃO

A alta demanda mundial por alimentos e o forte apelo da opinião pública sobre a conservação ambiental dos recursos naturais preconizam o cultivo sustentável do solo para atender as presentes e futuras necessidades da vida na Terra, sem comprometer o seu potencial produtivo para as futuras gerações (Hossain et al., 2020). Para isso, o uso da terra e o manejo do solo de modo racional devem permitir rendimentos economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Isso só será possível preservando a qualidade física, química e biológica do solo, permanentemente (Pittelkow et al., 2015).

O preparo do solo por meio de operações com arado e grade, denominado preparo convencional (PC), foi amplamente utilizado para todos os cultivos na região sul do Brasil entre as décadas de 1950 e 1970 (Bertol et al., 2012). A desagregação mecânica ocasionada pelos implementos de preparo, e a incorporação dos resíduos culturais no solo, resultando em superfície descoberta ao longo dos anos, contribuíram para a diminuição do teor de matéria orgânica e degradação estrutural do solo. Isso resultou em elevadas perdas de solo por erosão hídrica nos campos de cultivo naquela época (Bertol et al., 2012). Atualmente, o PC ainda é amplamente utilizado especialmente no cultivo de espécies hortícolas em geral e, em algumas regiões e/ou momentos, também em outros cultivos (Merten et al., 2015)

A partir do final da década de 1970, o PC foi gradativamente substituído pelo cultivo do solo sem o preparo mecânico prévio, denominado semeadura direta (SD). Essa mudança teve um grande efeito positivo na redução da erosão hídrica do solo e na redução do custo de implantação e condução das lavouras (Bertol et al., 2012). Atualmente, a SD predomina nos cultivos de soja e milho, mas ainda é praticada em

alguns cereais de inverno e em algumas outras culturas de menor expressão econômica de verão e inverno no Brasil (Fuentes-Llanillo et al., 2021).

Após a transição do PC para a SD, a produção das culturas agrícolas é sensivelmente reduzida nos anos iniciais de sua conversão. No entanto, o rendimento aumenta após um intervalo de aproximadamente três a cinco anos (Blanco-Canqui e Ruis, 2018). Isso ocorre à medida que a estrutura do solo se reorganiza e que a qualidade física, química e biológica do solo melhora (Six et al., 2004). Uma série de fatores são apresentados para explicar o baixo rendimento das culturas observado nos primeiros anos de adoção da SD sobre o PC. Um importante fator é a baixa capacidade de suporte e resistência do solo ao tráfego de máquinas agrícolas nesse período devido ao estado de degradação da estrutura física do solo, que é resultado do efeito residual do PC (Soane et al., 2012). Também, esse período não é suficiente para o pleno desenvolvimento da estrutura do solo que é dependente da acumulação de matéria orgânica e do reestabelecimento da plena atividade microbiana e da fauna do solo (Six et al., 2004). Outro fator refere-se a alta imobilização do nitrogênio aportado ao solo nessa fase (Soane et al., 2012).

A consolidação da SD é atingida após um interstício de dez a vinte anos de sua adoção, alcançando elevado estado de desenvolvimento de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, como resultado do contínuo aporte de resíduos culturais e incremento do teor de matéria orgânica do solo ao longo do tempo (Ligang et al., 2023). Na fase de consolidação da SD, ocorre aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, de retenção de água no solo, de taxa de mineralização da MO em relação à imobilização de nitrogênio e de ciclagem de nutrientes (Blanco-Canqui e Ruis, 2018).

Em áreas conduzidas sob SD há mais de cinco anos, em geral verifica-se aumento significativo do fósforo nos cinco centímetros superficiais do perfil do solo. O maior teor de P do solo observado na SD em relação ao PC pode ser devido à adição desse nutriente na superfície, à adsorção e à reciclagem pela mineralização dos resíduos culturais. O não-revolvimento do solo na SD reduz o contato entre o íon fosfato e os coloides do solo. Isso diminui a adsorção e aumenta a disponibilidade do elemento no solo e às plantas. O resultado disso pode ser a economia de fertilizantes fosfatados nesse sistema de manejo (Brown et al., 2018; Ligang et al., 2023)

Pesquisas de longa duração demonstram que o rendimento de grãos das culturas agrícolas manejadas na condição de SD é superior à condição manejada no PC. O maior rendimento observado na SD se deve ao aumento na capacidade de armazenamento de água, ciclagem de nutrientes e matéria orgânica do solo, e à diminuição das perdas de carbono por oxidação (Brown et al., 2018; Franchini et al., 2012; Muzurana et al., 2011)

Dessa forma, verifica-se que a SD se constitui num importante sistema de manejo capaz de recuperar a capacidade produtiva em relação ao solo manejado convencionalmente (Borges et al., 2015). A melhoria estrutural e funcional do solo decorre do fato de que a SD facilita a ocorrência de processos físicos, químicos e biológicos que agem de maneira inter-relacionada e sinérgica, basicamente porque aumenta a matéria orgânica do solo (Aziz et al., 2013).

Com base nisso, com esta pesquisa objetivou-se avaliar as alterações ocorridas alguns atributos químicos do solo após a conversão do manejo sob PC para a SD que foi denominada semeadura direta implantada (SDi) e, ao final de 30 meses após a conversão comparar esses atributos com a semeadura direta consolidada (SDc). Ainda, objetivou-se avaliar o desempenho dos atributos agrônômicos do milho

submetido às estas duas condições de manejo de solo estudadas, SDi e SDc, ao final da pesquisa.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida em um experimento implantado em 1995, em Lages SC, situada a 27° 49' de latitude sul e 50° 20' de longitude oeste, com altitude de 937 m, no sul do Brasil. O clima é do tipo Cfb segundo Köppen, com temperatura máxima média anual de 27 °C e mínima média anual de 11,5 °C. A precipitação média anual é de 1533 mm (Schick et al., 2014). O solo é classificado como Humic Inceptisol (USDA, 1999), (Cambissolo Húmico alumínico léptico (Santos et al., 2018)), com 443 g kg⁻¹ de argila, 402 g kg⁻¹ de silte e 155 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-30 cm (Bertol et al., 2004).

A sistematização do solo realizada em 1995 consta em Bertol et al. (2000). Historicamente, os tratamentos primários do experimento, nas parcelas, constituíam-se do PC e da SD, enquanto os tratamentos secundários, nas sub parcelas, constituíam-se na rotação (RC) e na sucessão (SC) de culturas. No PC, o preparo do solo era realizado uma vez ao ano, com uma operação de aração e duas de gradagem imediatamente antes da semeadura das culturas de primavera/verão. Até o ano de 2005, neste tratamento os resíduos dessas culturas eram retirados da superfície do solo ao final do cultivo, objetivando-se acelerar o processo de degradação do solo. Na SD, a implantação das culturas de primavera/verão era realizada com o uso de semeadoras mecanizadas, e as culturas de outono/inverno eram semeadas manualmente a lanço, mantendo-se os resíduos culturais sobre o solo. Os tratamentos secundários, RC e SC, foram conduzidos até 2012, com a sequência de espécies vegetais descritas em Andrade et al. (2012). A partir de 2012, o manejo do solo na

área experimental preservou os tratamentos primários, PC e SD, enquanto os tratamentos secundários, RC e SC, foram descartados. Assim, a partir desse ano no outono/inverno os cultivos foram comuns aos dois tratamentos primários.

Na primavera/verão de 2015-2016, portanto, ao final de vinte anos de condução do experimento, foi realizada a última operação de preparo do solo nas parcelas até então conduzidas sob PC, iniciando-se, nesse momento, a conversão do tratamento PC para a SD. Esse tratamento passou a ser denominado como semeadura direta implantada (SDi). As parcelas que vinham sendo anteriormente conduzidas sob SD não sofreram nenhuma alteração no seu manejo, passando a ser denominado como semeadura direta consolidada (SDc).

Após a conversão de manejo do PC para SDi, cultivou-se na primavera/verão dos anos de 2015 – 2016 e 2016 – 2017 a *Crotalaria juncea* L. e no outono/inverno desses dois anos cultivou-se Aveia preta (*Avena sativa* L.). Na primavera/verão de 2017 – 2018, cultivou-se a cultura do milho. Todos esses cultivos foram comuns à SDi e à SDc.

As amostragens de solo foram realizadas em dois momentos: a primeira amostragem (In) foi realizada imediatamente antes da conversão do PC para SDi (primavera/verão 2015 – 2016) somente no tratamento SDi, enquanto a segunda amostragem (Fn) foi realizada ao final da maturação da cultura do milho (primavera/verão 2017 – 2018), nos tratamentos SDi e SDc. O interstício de tempo compreendido entre a primeira e a segunda amostragem de solo foi de 30 meses. As amostras foram coletadas em três camadas do solo: 0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm. A acidez ativa (índice pH) do solo foi determinada em água na relação 1:1. O alumínio trocável (Al) foi extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulometria de neutralização com solução de NaOH a 0,0125 mol L⁻¹. Para a determinação do carbono orgânico total (COT), o solo foi

macerado em almofariz e peneirado em malha de 0,125 mm, sendo analisado por combustão seca a 800 °C no analisador COT. O fósforo disponível (P) e o potássio trocável (K) foram extraídos com solução ácida mista Melich⁻¹, sendo o P determinado em espectrofotômetro VIS no comprimento de onda igual a 660 nm e o K em fotômetro de chama. O cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica. A CTC efetiva foi calculada pela soma dos teores de Ca, Mg, K e Al. Todas as determinações dos atributos químicos seguiram as metodologias descritas em Tedesco et al. (1995).

O experimento está disposto em um delineamento experimental inteiramente casualizado, com oito repetições de cada tratamento, SDi e SDc. O arranjo experimental utilizado para análise estatística dos atributos químicos do solo obedeceu a um experimento em parcelas subdivididas em duas condições. Na primeira, foi analisado o efeito do tempo de adoção da SDi sobre o PC nos atributos químicos, de modo que os dois momentos de coleta das amostras (In e Fn) no tratamento SDi constituíram os tratamentos principais (parcelas), e as três camadas de solo amostradas constituíram os tratamentos secundários (sub parcelas) (Tabela 1). Na segunda condição, foram comparados os atributos químicos do solo nos tratamentos SDc e SDi ao final da pesquisa (Fn) (Tabela 2), de modo que os tratamentos SDi e SDc constituíram os tratamentos principais (parcelas) e as diferentes camadas de solo avaliadas os tratamentos secundários (sub parcelas).

Tabela 1. Valores de pH em água, alumínio (Al), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocável, fósforo extraível (P), carbono orgânico total (COT) e capacidade de troca de catiões (CTC) efetiva nas amostras de três camadas de solo coletadas antes

do início (In) e ao final (Fn) da pesquisa no tratamento SDi, compreendendo um hiato de 30 meses desde a conversão de manejo.

Table 1. Values of pH in water, exchangeable aluminum (Al), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg), soil organic carbon (COT), effective cation exchange capacity (CTC), and extractable phosphorus (P), in samples from three layers of soil collected before at the beginning (In) and at the end (Fn) of the experiment (30-month period).

Camada	pH água		Al		COT		CTC efetiva	
	In	Fn	In	Fn	In	Fn	In	Fn
Cm			cmol _c dm ⁻³		g kg ⁻¹		cmol _c dm ⁻³	
0-5	4,73	4,49	1,95	3,58	24,8	31,3	8,5 Ba	9,3 Aa
	Aa	Ba	Aa	Aa	Ba	Aa		
5-10	4,77	4,57	1,89	4,10	22,7	30,7	8,2 Ba	9,4 Aa
	Aa	Ba	Ba	Aa	Ba	Aa		
10-20	4,81	4,47	1,89	4,0 Aa	22,0	30,2	8,3 Ba	9,2 Aa
	Aa	Ba	Ba		Ba	Aa		
CV (%)	4,4/2,3		58,0/17,0		8,2/9,3		8,3/7,0	
Camada	P		K		Ca		Mg	
	In	Fn	In	Fn	In	Fn	In	Fn
Cm	-----		mg dm ⁻³ -----		-----		cmol _c dm ⁻³ -----	
0-5	17,7	18,4	143 Ba	256 Aa	5,5 Aa	4,4 Ba	0,61	0,68
	Aa	Aa					Aa	Aa
5-10	16,3	16,6	133 Aa	156 Ab	5,3 Aa	4,3 Ba	0,58	0,59
	Aa	Aa					Aa	Aa

10-20	19,1	13,9	132 Aa	145 Ab	5,5 Aa	4,1 Ba	0,52	0,62
	Aa	Aa					Aa	Aa
CV (%)	41,0/42,2		27,3/17,9		14,1/4,9		41,0/24,9	

Médias seguidas por mesma letra maiúscula na linha (In e Fn) e minúscula na coluna (camadas) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

CV: Coeficiente de variação para parcela (In e Fn) e subparcela (camadas) respectivamente.

Tabela 2. Valores de pH em água, alumínio (Al), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocável, fósforo extraível (P), carbono orgânico total (COT) e capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva nas amostras de três camadas de solo coletadas ao final da pesquisa na semeadura direta implantada (SDi Fn) e na semeadura direta consolidada (SDc).

Table 2. Values of pH in water, exchangeable aluminum (Al), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg), soil organic carbon (COT), effective cation exchange capacity (CTC), and extractable phosphorus (P), in samples from three layers of soil collected at the end of the experiment in implemented no-tillage (SDi Fn) and consolidated no-tillage (SDc).

Camada	pH água		Al		COT		CTC efetiva	
	SDi Fn	SDc	SDi Fn	SDc	SDi Fn	SDc	SDi Fn	SDc
cm	-----		cmol _c dm ⁻³		g kg ⁻¹		cmol _c dm ⁻³	
0-5	4,49	4,38	3,58		31,3	52,1		10,0
	Aa	Ab	Aa	2,66 Ab	Ba	Aa	9,3 Aa	Aa
5-10	4,57	4,61	4,10		30,7	37,3		10,8
	Aa	Aa	Aa	3,41 Aa	Ba	Ab	9,4 Ba	Aa

10-20	4,47 Ba	4,70 Aa	4,00 Aa	2,88 Aab	30,2 Aa	32,3 Ac	9,2 Ba	10,4 Aa		
CV (%)	6,1/3,4		51,0/15,4		8,8/9,6		10,2/6,4			
Camada	P		K		Ca		Mg			
	SDi	Fn	SDc		SDi	Fn	SDc	SDi	Fn	SDc
cm	----- mg dm ⁻³ -----				----- cmol _c dm ⁻³ -----					
0-5	18,4 Ba	46,2 Aa	256 Aa	201 Aa	4,4 Ba	6,1 Aa	0,68 Aa	0,82 Aa		
5-10	16,6 Aa	21,6 Ab	156 Ab	188 Aab	4,3 Ba	6,1 Aa	0,59 Aa	0,79 Aa		
10-20	13,9 Aa	13,2 Ab	145 Ab	147 Ab	4,1 Ba	6,3 Aa	0,62 Ba	0,89 Aa		
CV (%)	33,0/38,8		44,5/21,1		24,8/23,2		45,2/19,9			

Médias seguidas por mesma letra maiúscula na linha (SDi Fn e SDc) e minúscula na coluna (camadas) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

CV: Coeficiente de variação para parcela (SDi Fn e SDc) e subparcela (camadas) respectivamente.

O milho, semeado no início da primavera/verão de 2017-2018, foi submetido a duas doses de adubação nitrogenada em cobertura, supridas por ureia, em uma única aplicação a lanço, quando a cultura alcançou o estágio V5 de desenvolvimento. As duas doses de adubação nitrogenada em cobertura estudadas foram: 0 kg ha⁻¹ de N (SUR) e 225 kg ha⁻¹ de N (CUR); nos dois manejos de solo estudados, SDi e SDc. O arranjo experimental no milho obedeceu, dessa forma, a um esquema fatorial 2 x 2 com quatro repetições (Tabela 3), de modo que foram testados dois níveis do fator

adubação nitrogenada (CUR e SUR) e dois níveis do fator manejo do solo (SDi e SDc). A adubação mineral de base, comum a todos os tratamentos, foi fornecida no momento da semeadura na dose de 45 kg ha⁻¹ de N, 165 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O.

Tabela 3. Valores de massa seca da parte aérea (MSA), massa seca de raízes (MSR), produtividade de grãos (PRG) e massa de mil grãos (MMG) de milho, com ureia (CUR) e sem ureia (SUR), nos dois tratamentos estudados

Table 3. Aboveground dry biomass (MSA), root dry biomass (MSR), grain productivity (PRG) and thousand-grain weight (MMG) of corn under SDi or SDc, with (CUR) and without (SUR) urea addition.

	CUR	SUR	Média	CUR	SUR	Média
Tratamento	----- MSA (Mg ha ⁻¹) -----			----- MSR (Mg ha ⁻¹) -----		
	----			----		
SDi	6,7 bA	4,6 bB	5,6 b	1,6 aA	0,9 bB	1,2 b
SDc	8,8 aA	7,9 aA	8,3 a	2,2 aA	1,9 aA	2,0 a
Média	7,7 A	6,2 B	-	1,9 A	1,4 B	-
CV(%)	17,4		-	27,1		-
Tratamento	----- PRG (Mg ha ⁻¹) -----			----- MMG (g) -----		
	----			-		
SDi	9,4 aA	5,0 aB	7,2 a	347 aA	291 aB	319 a
SDc	11,2 aA	7,9 aB	9,5 a	352 aA	302 aB	327 a
Média	10,3 A	6,4 B	-	349 A	297 B	-
CV(%)	23,2		-	10,4		-

SDi: semeadura direta implantada; SDc: semeadura direta consolidada. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, quando iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Os atributos agronômicos estudados da cultura do milho foram a massa seca da parte aérea (MSA), a massa seca de raízes (MSR), a massa de mil grãos (MMG) e produção de grãos (PRG). A MSA e MSR foram estimadas a partir da coleta de duas plantas por parcela no momento da maturação fisiológica do milho. A parte aérea e as raízes das plantas foram secas em estufa a 65 °C até atingirem peso constante. O PRG e a MMG foram estimados a partir da coleta de todas as espigas de milho presentes em uma área útil de 4 m² no centro de cada parcela, no momento da maturação da cultura. A massa de grãos foi corrigida e padronizada para umidade de 13%. Todos os resultados foram submetidos à análise de variância e quando significativos ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH em água observados na SDi foram em geral baixos, variando entre 4,47 e 4,81, com diferença estatística significativa entre as épocas estudadas (Tabela 1). O decréscimo no pH do solo ocorreu com correspondente aumento do Al trocável e decréscimo do Ca ao final da pesquisa na SDi. Na SDc, observou-se menor pH na camada superficial do solo (4,38) em relação às camadas inferiores (Tabela 2). Ciotta et al. (2002) e Brown et al. (2018) também constataram valores baixos de pH em sistema de semeadura direta nas camadas superficiais do solo. Os autores atribuíram esta frente de acidificação à nitrificação de fertilizantes amoniacais e à decomposição dos resíduos culturais, com conseqüente liberação de ácidos orgânicos.

A ausência de mobilização do solo desde a sua implantação e o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial da SDc, contribuíram para o tamponamento das fontes geradoras de acidez no solo ao longo do tempo. Isso manteve o valor de pH mais alto na camada inferior (4,70) neste sistema de manejo (Tabela 2). Comparativamente à SDc, o menor pH encontrado na camada de 10 – 20 cm na SDi é atribuído ao efeito residual do PC. Isso diluiu a acidez gerada no solo ao longo do tempo pelas operações de preparo que eram realizadas na camada arável antes da conversão do manejo. O teor de Al trocável foi maior ao final da pesquisa no tratamento SDi, com diferença nas camadas 5 - 10 cm e 10 – 20 cm do solo (Tabela 1). O maior teor de Al ao final da pesquisa na SDi é justificado pela diferença de pH entre os dois períodos estudados. O pH mais baixo encontrado ao final da pesquisa pode ter favorecido o aumento do teor de Al trocável em detrimento de espécies poliméricas precipitadas (Vieira et al., 2009).

Não houve diferença no teor de Al trocável entre a SDi e a SDc para todas as camadas de solo ao final da pesquisa (Tabela 2). O menor teor de Al trocável na camada superior da SDc ($2,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) é atribuído à presença de maior quantidade de COT nesta camada ($52,0 \text{ g kg}^{-1}$). Isto contribuiu para complexação de parte deste cátion com a fração orgânica do solo, como sugerido por Ciotta et al. (2002) e Vieira et al. (2009). O teor de Al trocável, embora alto, foi menor do que o encontrado por Almeida et al. (2005) na condição original de campo nativo ($7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), evidenciando que nesta pesquisa o efeito residual da calagem persistiu no tempo.

A transição do PC para a SDi aumentou o estoque de COT ao final da pesquisa em todas as camadas do solo (Tabela 1), porém, sem gradiente de concentração em profundidade. Isso ocorreu devido à mudança de manejo, excluindo-se o preparo mecânico, de modo que a adoção da SDi permitiu o acúmulo de resíduos culturais no

solo, refletindo-se no aumento dos estoques de COT em todas as camadas avaliadas ao final da pesquisa. Wulanningtyas et al. (2021) sugerem que a implantação da SD é capaz de proporcionar proteção física à fração orgânica do solo pela formação e estabilidade de agregados estruturais neste manejo. Esta proteção se dá pela redução da taxa de difusão de oxigênio para o interior dos agregados, diminuindo assim os processos oxidativos sobre a matéria orgânica. Também, pela barreira física formada que dificulta o acesso dos microrganismos ao substrato orgânico, refletindo-se em acúmulo de carbono orgânico ao longo do tempo.

Na SDc ocorreu o maior estoque de COT nesta pesquisa, com gradiente decrescente em profundidade nas camadas de solo avaliadas (Tabela 2). Almeida et al. (2005) observaram concentração de COT igual a $35,0 \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0–5 cm, em estudo feito na mesma classe de solo na condição original de campo nativo. Destaca-se, dessa forma, que a SDc aumentou o estoque de carbono orgânico em 48%, após 22 anos de cultivo. A adoção da SDi não foi capaz de atingir o conteúdo original de COT desse solo após o período de 30 meses da conversão de manejo, tampouco igualar o conteúdo observado na SDc.

Não houve diferença no teor de P entre os dois períodos estudados na SDi (Tabela 1). Também não se formou gradiente de concentração deste elemento no perfil do solo estudado ao final da pesquisa. O maior teor de P foi encontrado na camada 0 – 5 cm da SDc ($46,2 \text{ mg dm}^{-3}$), superior ao valor encontrado na SDi para a mesma camada de solo (Tabela 2). Para as demais camadas não foi detectada diferença estatística. Dessa forma, evidencia-se que o período de 30 meses desta pesquisa SDi não foi suficiente para alterar a dinâmica e a concentração de P nas camadas do solo. O maior conteúdo de P encontrado na camada superficial da SDc ($46,2 \text{ mg dm}^{-3}$) em relação ao observado nas camadas inferiores (Tabela 2) também foi reportado por

outros autores (Ligang et al., 2023; Nunes et al., 2011; Spera et al., 2011). Esses autores atribuíram a dinâmica apresentada pelo P na SDc à baixa área de contato entre o P proveniente das adubações fosfatadas e a fração mineral do solo, à manutenção dos resíduos culturais sobre a superfície e à baixa mobilidade deste nutriente no solo. O teor de P foi superior ao teor crítico (12 mg dm^{-3}) estabelecido para esta classe textural de solo (CQFS/SC, 2016) para todas as épocas, tratamentos e camadas de solo estudadas.

A concentração de K foi substancialmente maior ao final da pesquisa do que no início na camada de 0 – 5 cm no tratamento SDi (Tabela 1), enquanto nas demais camadas não houve diferença no período estudado. Não houve diferença no teor de K entre a SDi e a SDc para as três camadas de solo (Tabela 2). No entanto, para os dois tratamentos verificou-se acúmulo desse nutriente na camada superficial (0 – 5 cm) em relação às camadas inferiores do solo.

O aumento de K na camada superficial do solo na SDi ao final da pesquisa pode ser justificado pela mineralização desse elemento da biomassa vegetal das culturas no decorrer do estudo. A Crotalaria produziu 25 Mg ha^{-1} de massa seca no tratamento SDi e $31,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ na SDc nos dois anos de cultivo antes do início desta pesquisa. A alta quantidade de biomassa contribuiu para o acúmulo de K na superfície do solo nos dois tratamentos, mas principalmente na SDi. Segundo Pereira et al. (2017), a Crotalaria tem grande capacidade de absorção de K, podendo acumular cerca de 16 g kg^{-1} de K no tecido vegetal da cultura. Além disso, esse elemento é rapidamente liberado ao solo a partir da decomposição da biomassa após o manejo da cultura, fato também observado por Costa et al. (2012). Dessa forma, o elevado conteúdo de K liberado pela Crotalaria e a permanência dos resíduos culturais sobre o solo contribuíram para o significativo aumento de K no tratamento SDi ao final da pesquisa.

O teor de Ca foi menor ao final da pesquisa do que no início em todas as camadas do solo na SDi (Tabela 1). A redução média de 21 % desse nutriente é atribuída ao decréscimo do pH e ao aumento do Al trocável na fase final do estudo. O aumento no conteúdo de Al trocável observado no final da pesquisa deslocou parte da quantidade de Ca presente na CTC para a solução do solo, dada a preferência do Al em relação ao Ca pelos sítios de adsorção eletrostática, como observado por Spera et al. (2014). Como resultado dessa dinâmica, parte da quantidade de Ca deslocada para solução do solo pode ter sido lixiviada pela ação da água das chuvas e outra parte foi imobilizada na biomassa da cultura do milho. Como nenhuma colheita ocorreu, o Ca não foi extraído do solo durante o período deste estudo.

Na SDc os valores de Ca foram maiores do que na SDi em todas as camadas analisadas (Tabela 2). A maior concentração deste nutriente na SDc é atribuída ao maior conteúdo de matéria orgânica presente neste manejo. Isto contribuiu para o aumento da CTC efetiva do solo, refletindo-se em maior adsorção de Ca à fase sólida, como relatado por Briedis et al. (2012) e Ciotta et al., (2002).

O teor de Mg não diferiu entre os períodos estudados na SDi em todas as camadas do solo (Tabela 1). Ao final da pesquisa, a SDc apresentou teor de Mg maior na camada de 10 – 20 cm em relação a SDi, enquanto nas demais camadas não foi observada diferença estatística. Semelhante ao Ca, não foi verificada diferença na distribuição deste nutriente entre as diferentes camadas de solo nos dois tratamentos estudados. O teor de Mg apresentado nos dois tratamentos, SDi e SDc, ficou abaixo do limite crítico estabelecido pela CQFS/SC (2016) de $1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, enquanto o teor de Ca situou-se acima do limite crítico de $4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

A CTC efetiva aumentou em 12% na média das três camadas de solo na SDi (Tabela 2). Essa mudança positiva na CTC da SDi ao final da pesquisa se deveu ao aumento

do estoque de COT após a conversão de manejo do PC para a SDi. Em um Cambissolo Húmico catarinense verificou-se que houve relação linear entre o carbono e a CTC (Ferreira, 2013), significando que o incremento em uma unidade percentual de COT ocorreu um aumento de $2,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na CTC a pH 7,0.

A massa seca da parte aérea (MSA) foi um dos atributos agrônômicos do milho que respondeu ao efeito residual do tratamento principal (manejo do solo), tanto na presença quanto na ausência de ureia, tendo sido maior na SDc do que na SDi (Tabela 3).

A aplicação de ureia em cobertura proporcionou incrementos na MSA de 11,4% na SDc e 45,6% na SDi, evidenciando dessa forma a maior dependência de adubação nitrogenada no milho cultivado na SDi em relação ao milho cultivado na SDc para essa variável estudada. A massa seca de raízes (MSR) respondeu somente na ausência de ureia. Assim, a SDc, consolidada há 22 anos, manifestou, numericamente, maior diferença de produção de MSA de milho na ausência de ureia do que na presença desse adubo, em relação à SDi implantada após 20 anos de PC. Essa diferença se explica: na SDc o solo apresentava concentração de COT 66% maior do que na SDi na camada de 0-5 cm e 21% maior na camada de 5-10 cm. Isso proporcionou liberação de maior quantidade de N por mineralização naquele tratamento do que neste. O maior teor de Ca, Mg e P na SDc também contribuiu no aporte de nutrientes ao milho durante o ciclo, refletindo-se no melhor desempenho das variáveis vegetativas da cultura na SDc. No caso da MSR, a diferença também foi importante, tendo sido 90% maior na SDc do que na SDi na ausência de ureia, com a justificativa dada para a MSA. Na presença de ureia, a MSR foi 38% maior na SDc do que na SDi. Embora sem diferença estatística, este valor deve ser considerado positivo pelo fato dessa maior quantidade de raízes agregar mais benefícios ao solo na SDc.

No caso da produtividade de grãos (PRG) e massa de mil grãos (MMG) de milho, com e sem ureia, não houve resposta estatística entre os tratamentos para ambas as variáveis (Tabela 3). No entanto, é importante salientar a tendência de ocorrer maior valor numérico para a SDc em relação à SDi. Assim, a PRG e a MMG foram respectivamente 32% e 2% maiores na SDc do que na SDi, na média dos dois tratamentos secundários referentes à ureia.

Considerando-se o conjunto dos dados referentes aos atributos do milho, incluindo os que apresentaram diferença estatística e os que mostraram apenas tendência numérica, é possível confirmar a superioridade do tratamento SDc em relação ao SDi. Com isso, é possível inferir-se que o longo período de condução da pesquisa a SD proporcionou no solo condições positivas os principais atributos agronômicos do milho. Esse benefício foi percebido na SDc, em que o solo foi previamente manejado sob SD, em relação à SDi, em que o solo foi previamente manejado sob PC, independentemente de adubação em cobertura com ureia.

A aplicação de ureia em cobertura respondeu nos atributos agronômicos do milho em relação à ausência dessa adubação, com exceção da MSR e MSA no tratamento SDc (Tabela 3). Assim, é possível afirmar que havia menor conteúdo de nitrogênio potencialmente mineralizável no solo durante o ciclo da cultura (Fontoura e Bayer, 2009). Isso deve ter aumentado a dependência em ureia para o incremento na produtividade destes dois atributos do milho. O ganho em produtividade de MSA do milho foi de 24%, enquanto o ganho de PRG e de MMG foi respectivamente de 61% e 18%, na média dos dois tratamentos de manejo do solo. No tratamento SDi, a aplicação de ureia respondeu com 78% na MSR em relação à ausência do adubo nitrogenado. A maior concentração de COT, de soma de bases e de P e a menor

concentração de Al trocável na SDc favoreceram o índice de produção dos caracteres vegetativos do milho neste tratamento.

A produtividade de grãos (PRG) foi afetada pelo fator ureia nos dois manejos de solo, com incrementos de produtividade na ordem de 88% na SDi e 41% na SDc (Tabela 3). Apesar da interação resultar em efeito não significativo para o fator manejo do solo quanto a este atributo, na média a SDc apresentou maior rendimento de grãos que a SDi. As justificativas para o melhor desempenho da SDc e para o incremento proporcionado pela ureia na produção de MSA e MSR discutidos anteriormente, também podem ser aplicadas para o desempenho do rendimento de grãos.

A MMG foi afetada pela ureia, enquanto o fator sistema de manejo não afetou este atributo (Tabela 3). Outros autores (Kappes et al., 2014) também constataram aumentos na MMG com a aplicação de doses crescentes de nitrogênio na cultura do milho, contribuindo para incrementos deste componente do rendimento na produtividade final de grãos.

CONCLUSÕES

A conversão de manejo do preparo convencional (PC) conduzido por um período de 20 anos para a semeadura direta (SDi), proporcionou redução no pH em água e aumento no Al trocável, com correspondente decréscimo das bases do solo, em especial no Ca, ao final de um período de 30 meses após a conversão de manejo. Como aspectos positivos da conversão de manejo nesse tratamento destacam-se o aumento do K trocável e COT no solo. O período de 30 meses após a conversão de manejo para a SDi não foi suficiente para equiparar o estado de desenvolvimento dos atributos químicos do solo apresentados pela semeadura direta consolidada (SDc) ao final de 22 anos de manejo, exceto para o K.

A produção de massa seca da parte aérea (MSA) e de massa seca de raízes (MSR) de milho cultivado na SDi na sequência do PC é inferior à do milho cultivado na SDc, enquanto a PRG e a MMG do milho não responderam à conversão de manejo do solo. A MSA e MSR do milho apresentaram resposta à aplicação de ureia apenas no tratamento da SDi, enquanto a PGR e MMG do milho responderam à aplicação do fertilizante nos dois tratamentos de manejo do solo, com aumento de produção em relação à ausência do fertilizante.

REFERÊNCIAS

- Almeida, J. A., Bertol, I., Leite, D., Amaral, A. J., e Zoldan Junior, W. A. (2005). Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(3), 437-445. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300014>
- Andrade, A. P., Mafra, A. L., Picolla, C. D., Albuquerque, J. A., e Bertol, I. (2012). Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. *Ciência Rural*, 42(5), 814-821. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000013>
- Aziz, I., Mahmood, T., & Islam, K. R. (2013). Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil & Tillage Research*, 131(1), 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002>
- Bertol, I., Albuquerque, J. A., Leite, D., Amaral, A. J., e Zoldan Junior, W. A. (2004). 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*, 28(1), 155-163. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015>

- Bertol, I., Mafra, A. L., Cogo, N. P., Barbosa, F. T., Miquelluti, D. J., Oliveira, L. C., Rech, T. D., e Moreira, M. A. (2012). *Manejo e conservação do solo e da água: retrospectiva, constatação e projeção*. 1ª ed., Universidade do Estado de Santa Catarina.
- Bertol, I., Schick, J., Massariol, J. M., Reis, E. F., e Dily, L. (2000). Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. *Ciência Rural*, 30(1), 91-95. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000100015>
- Blanco-canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Borges, W. L. B., Freitas, R. S., Mateus, G. P., Sá, M. E., e Alves, M. C. (2015). Produção de soja e milho cultivados sobre diferentes coberturas. *Revista Ciência Agronômica*, 46(1), 89-98. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902015000100011>
- Briedis, C., Sá, J. C. M., Caires, E. F., Navarro, J. F., Inagaki, T. M., e Ferreira, A. O. (2012). Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta a calagem superficial em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(7), 1007-1014. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000700018>
- Brown, V., Barbosa, F. T., Bertol, I., Mafra., A. L., e Muzeka., L. M. (2018). Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 13(1), 1-7. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5501>
- Ciotta, M. N., Bayer, C., Ernani, P. R., Fontoura, S. M. V., Wobeto, C., e Albuquerque, J. A. (2002). Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(4), 317-326. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400023>

- Comissão de Química e Fertilidade do solo – RS/SC. (2016). *Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. (11ª ed.) Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul.
- Costa, C. H. M., Crusciol, C. A. C., Soratto, R. P., e Ferrani N, J. (2012). Persistência e liberação de macronutrientes e silício da fitomassa de crotalária em função da fragmentação. *Bioscience Journal*, 28(3), 384-394. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/40335>
- Fontoura, S. M. V. e Bayer, C. (2009). Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(6), 1721-1732. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600021>
- Franchini, J. C., Debiasi, H., Junior, A. A. B., Tonon, B. C., Farias, J. R. B., Oliveira, M. C. N., & Torres, E. (2012). Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil, *Field Crops Research*, 137(1), 178-175. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.003>
- Ferreira, E. R. N. C. (2013). *Química e mineralogia de solos desenvolvidos de rochas alcalinas e ultrabásicas do Domo de Lages*. [Tese de Doutorado] Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC. Lages, 161p. https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1473/FERREIRA_ERC_Quimica_e_mineralogia_de_solos_desenvolvidos_2014_Copy_1_2_15693557_806191_1473.pdf
- Fuentes-Llanillo, R., Telles, T. S., Junior, D. S., de Melo, T. R., Friedrich, T., & Kassam, A. (2021). Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 208, 104877. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104877>

- Hossain, A., Krupnik, T.J., Timsina, J., Mahboob, M.G., Chaki, A.K., Farooq, M., Bhatt, R., Fahad, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). Agricultural land degradation: processes and problems undermining future food security. *Environment, climate, plant and vegetation growth*, 17-61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_2.
- Kappes, C., Arf, O., Bem, E. A. D., Portugal, J. R., e Gonzaga, A. R. (2014). Manejo do nitrogênio em cobertura na cultura do milho em sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 13(2), 201-217. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153013047>
- Ligang, LV., Gao, Z., Liao, K., Zhu, Q., & Zhu, J. (2023). Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth. *Soil and Tillage Research*, 225, 105527. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105527>
- Merten, G.H., Araújo, A.G., Biscaia, R.C.M., Barbosa, G.M.C., & Conte, O. (2015). No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 152, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.014>
- Muzurana, M., Levien, R., Muller, J., e Conte, O. (2011). Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 1197-1206. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400013>
- Nunes, R. S., Sousa, D. M. G., Goedert., W. J., e Vivaldi., L. J. (2011). Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(3), 877-888. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300022>

- Pereira, A. P., Schoffel, A., Koefender, J., Camera, J. N., Golle, D. P., e Horn, R. C. (2017). Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. *Revista de Ciências Agrárias*, 40(4), 799-807. <https://doi.org/10.19084/RCA17065>
- Pittelkow, C.M., Liang, X., Linquist, B.A., Van Groenigen, K.J., Lee, J., Lundy, M.E., Van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., & Van Kessel, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517, 365–368. <https://doi.org/10.1038/nature13809>
- Santos, H. D., Jacomine, P., Anjos, L., Oliveira, V., Lumbreras, J., Coelho, M., e Oliveira, J. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação do Solo*. 5. ed., Brasília, DF: EMBRAPA, 356p <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>
- Schick, J., Bertol, I., Cogo, N. P., e González, A. P. (2014). Erosividade das chuvas de Lages, Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(6), 1890-1905. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600024>
- Six, J., Ogle, S.M., Breidt, F.J., Conant, R.T., Mosier, A.R., e Paustian, K. (2004). The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global Change Biology*, 10, 155–160. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x>
- Spera, S. T., Escosteguy, P. A. V., Denardin, J. E., Klein, V. A., e Santos, H. P. (2011). Atributos químicos restritivos de Latossolo Vermelho distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. *Revista Agrarian*, 4(14), 324-334. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/914249>
- Spera, S. T., Escosteguy, P. A. V., Santos, H. P., e Klein, V. A. (2014) Atividade do alumínio na solução do solo em um Latossolo Vermelho Distrófico submetido

ao manejo do solo e das culturas. *Nativa*, 2(3), 131-137.

<https://doi.org/10.31413/nativa.v2i3.1372>

Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-strade, J., (2012). No-till in northern, western and southwestern Europe: a review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>

Tedesco, M. J., Ianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H., e Volkweiss, S. J. (1995). *Análise de solos, plantas e outros materiais*. 2. ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174p.

USDA, United States Department of Agriculture. (1999). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Agriculture Handbook nº 436, 2. ed. Washington, DC, 886p. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-taxonomy>

Vieira, F. C. B., Bayer, C., & Zanatta, J. (2009). Organic matter kept Al toxicity low in a subtropical no-tillage soil under long-term (21 – years) legume – based crop system and N fertilisation. *Australian Journal of Soil Research*, 47, 707 – 714. <http://dx.doi.org/10.1071/SR08273>

Wulanningtyas, H. S., Gong, Y., Li, P., Sakagami, N., Nishiwaki, J., & Komatsuzaki, M. (2021). A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. *Soil and Tillage Research*, 205, 104749. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104749>