



A SOLUÇÃO DO SOLO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO SUBMETIDO A TRÊS TIPOS DE MANEJO DE SOLO E DE CULTURAS

Silvio Tulio SPERA¹, Pedro Alexandre Varella ESCOSTEGUY²,
Henrique Pereira dos SANTOS², Vilson Antonio KLEIN³

¹Embrapa Agrossilvopastoril, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

²Embrapa Trigo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

³Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

*E-mail: silvio.spera@embrapa.br

Recebido em dezembro/2013; Aceito em maio/2014.

RESUMO: O objetivo do trabalho foi avaliar a interação destes fatores nos atributos químicos da solução de solo de duas camadas de solo situadas entre 0 a 20 cm. O experimento foi conduzido em Passo Fundo, RS, em um Latossolo Vermelho distrófico, após mais de duas décadas de cultivo, sem aplicação de calcário. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de subparcelas. Os tratamentos foram: plantio direto; cultivo mínimo com escarificador; e preparo convencional com arado e grade. Estes foram combinados com as rotações de culturas: trigo/soja; trigo/soja-ervilhaca/sorgo e trigo/soja-ervilhaca/sorgo-aveia branca/soja, para avaliar o efeito da interação dessas rotações com o tipo de manejo de solo nos atributos químicos da solução do solo, nas camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm. Não houve correlações entre os atributos de solo avaliados, em ambas as camadas, mesmo havendo diferenças de níveis de restrição físicas e químicas entre as camadas. Os atributos químicos da solução do solo não foram influenciados pela interação dos fatores estudados, sendo pouco influenciados pela rotação de culturas. O plantio direto propiciou maiores valores de carbono orgânico dissolvido e menor teor e atividade de Al na solução do solo, que pode amenizar a toxidez de Al.

Palavra-chave: nutrientes; plantio direto, preparo convencional, química do solo.

THE SOIL SOLUTION OF A TYPIC HAPLUSTOX UNDER THREE SOIL MANAGEMENTS AND CROP ROTATIONS

ABSTRACT: The goal of this work was to evaluate the interaction of these two factors in grain production of crops (harvest 2007), and chemical attributes of the soil solution of two soil layers situated among 0 to 20 cm. The experiment was conducted in Passo Fundo, RS, in a Typic Haplustox, after more than two decades of cropping without limestone application. The experimental design was randomized block, in subplots scheme. The treatments were: no-tillage; minimum cultivation with chisel plow; and conventional plowing with disk plow. These were combined with crop rotations: wheat-soybean (R1); wheat-soybean/common vetch-sorghum and wheat-soybean/common vetch-sorghum/white oats-soybean, to assess the interaction effect of these rotations with the type of soil management in the chemical attributes of soil solution in layers of 0 to 6.7 cm and 6.8 to 20 cm. There were no correlations between the soil attributes evaluated on both layers, even when differences in levels of chemical and physical constraint between the layers. Chemical attributes of soil solution were not influenced by the interaction of the studied factors, being slightly influenced by crop rotation. The no-till provided the greatest values of dissolved organic carbon and Al lowest level and activity in soil solution, promoting the Al toxicity.

Keywords: soil nutrients; no-till, soil plowing, soil chemistry.

1. INTRODUÇÃO

A solução do solo consiste no local predominante de ocorrência das reações químicas no solo e o meio natural para o crescimento e desenvolvimento das plantas, além de abrigar as frações químicas dos elementos imediatamente disponíveis no ambiente (WOLT, 1994). Sendo assim, o conhecimento da composição química da

solução é de grande importância, tanto para estudos de manejo ambiental, como da fertilidade do solo e da nutrição de plantas (CIOTTA et al., 2002; SPARKS, 2003). A composição e a força iônica da solução do solo são importantes na maioria dos aspectos da química do solo, sendo indicador da biodisponibilidade dos nutrientes. Porém, a análise da solução tem sido

empregada somente em trabalhos de pesquisa e não para análise de rotina do solo, porque sua extração em condições de campo incorre em grandes dificuldades metodológicas (CANCÉS et al., 2003). O procedimento tradicional para a obtenção da solução envolve o deslocamento da solução do solo úmido. Este procedimento requer grande quantidade de amostra de solo e consome muito tempo. Devido às dificuldades de obtenção da solução do solo, diversas relações entre solução e extrato de solo têm sido utilizadas. Isto está sendo possível, pois há forte correlação entre a força iônica da solução e a condutividade elétrica do extrato de solo, permitindo a predição de quantidades relativas de cátions na solução, parâmetros importantes nos estudos de nutrição de plantas (SPARKS, 2003).

A extração da solução do solo é demorada, porque somente um pouco de amostra líquida pode ser extraída ao mesmo tempo. Isto pode levar a problemas, porque a composição da solução pode mudar substancialmente durante o período de armazenamento antes de ser obtida (WOLT, 1994). Para obtenção de resultados que se aproximem da verdadeira composição da solução do solo, a mesma deve ser extraída imediatamente após a amostragem (ZAMBROSI et al. 2008; MEURER; ANGHINONI, 2012).

A solução do solo tem uma dinâmica complexa, e os elementos que se estão dissolvidos são afetados pelo efeito cinético de várias reações, como o equilíbrio entre ácido e base, complexação iônica, precipitação e dissolução de sólidos, oxidação, redução e troca iônicas (GEBRIM et al., 2008; MEURER; ANGHINONI, 2012). Nos solos adubados, a concentração da maioria dos cátions (Ca, Mg, K e Na) na solução é determinada pelo equilíbrio com os cátions trocáveis (SPARKS, 2003).

A calagem em solos ácidos é, provavelmente, a prática agrícola com o maior potencial para alterar a composição do complexo de troca e conseqüentemente da solução do solo. Em razão do rápido equilíbrio entre as fases sólida e líquida do solo, os efeitos da calagem manifestam-se rapidamente sobre a dinâmica de íons em solução (AMARAL; VETORAZZO, 2005).

O problema da medida de concentração ou atividade de íons, nutrientes ou quaisquer substâncias na solução do solo tem sido abordado há muito tempo, porém, nenhuma solução satisfatória foi encontrada até o presente, provavelmente devido à própria complexidade do sistema solo-solução. O método comumente utilizado consta da agitação de certa quantidade de solo com uma solução extratora, em dada proporção e por determinado tempo. Várias críticas têm sido impostas a este procedimento, a principal delas por envolver a completa destruição do arranjo natural do sistema poroso solo-solução do solo (GLOAGUEN et al., 2009).

A solução aquosa contida nos poros do solo é um sistema dinâmico aberto, dependente de inúmeras reações que podem ocorrer simultaneamente entre as três fases constituintes do solo, as quais variam com o tempo e com o espaço. Um sistema tão complexo e de difícil reconstrução em laboratório, assim mesmo, muitos estudos são feitos com aplicação de princípios químicos (PÉREZ; CAMPOS, 2005). Mesmo havendo grandes dificuldades de trabalho com solução do solo, de variabilidade de métodos de obtenção e de dependência

das condições de solo e clima, o estudo da solução com detalhamento em nível de especiação iônica contribui para elucidação de dúvidas na química do solo, principalmente no sistema plantio direto, no qual, importantes alterações ocorrem no sistema (ZAMBROSI et al., 2008). Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a interação destes fatores nos atributos químicos da solução de solo de duas camadas de solo situadas entre 0 a 20 cm.

2. MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, foram selecionadas parcelas de um experimento instalado sobre um Latossolo Vermelho distrófico localizado no município de Passo Fundo, RS. O experimento foi conduzido, durante 25 anos, em delineamento de blocos casualizados, com esquema de subparcelas, envolvendo tratamentos de manejo de solo: plantio direto (PD); preparo mínimo de solo com escarificador de hastes (PM) e; revolvimento com arado e grades, uma vez ao ano, antecedendo a cultura de inverno (PC). Em cada um dos tratamentos de manejo de solo, continha, como subparcela, as rotações de culturas trigo/soja (R1), trigo/soja e ervilhaca/sorgo (R2) e, trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja (R3). Não houve reaplicação de calcário nas parcelas por 22 anos. As amostras foram coletadas em junho de 2007, em dois ambientes edáficos distintos, representados pelas camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm, amostras estas destinadas às análises químicas de rotina. A espessura da camada superficial foi adotada em função do efeito do mecanismo de rompimento da sementeira na superfície do solo. Foram coletadas amostras de plantas para avaliação do rendimento de grãos e a massa da matéria seca da parte aérea das culturas de trigo, aveia branca, ervilhaca, soja e sorgo.

A solução do solo foi extraída pelo método da pasta saturada. No preparo do extrato de saturação foi usado solo peneirado (2 mm), que foi umedecido, até atingir a umidade relativa à capacidade de campo (6 kPa). Os valores da umidade volumétrica, na tensão de 6 kPa, variaram com a amostra, situando-se ao redor de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Após serem saturadas com água deionizada, as amostras permaneceram 24 hs em repouso, a 4°C . Em seguida, foram acondicionadas em tubos de teflon, de 500 mL. A solução foi extraída em centrífuga por 30 min. a 3.200 r.p.m. Após a centrifugação, as amostras foram decantadas e filtradas com bomba de vácuo em membrana filtrante com poros de $42 \mu\text{m}$.

Obtidas as amostras da solução do solo, procedeu-se, imediatamente, as leituras de pH, condutividade elétrica com condutivímetro e potencial redox com potenciômetro com eletrodo de Pt. As amostras da solução foram então fracionadas e parte da alíquota (10 mL) foi acidificada a pH 3,0, com HCl ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$), acondicionada em frascos plásticos de 100 mL e mantida em congelador. As análises de K e de Na foram realizadas em fotômetro de chama, enquanto que as de Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn e Cu em espectrofotômetro de absorção atômica.

Os ânions e o C orgânico dissolvido (COD) foram analisados em amostras acidificadas com sistema de cromatografia iônica, com soluções ultrafiltradas e diluídas em água pura. O COD foi determinado com amostras filtradas em membrana com diâmetro de poros

de 0,45 µm e 1,5 mL de dicromato de potássio 0,1 N, com incubação em estufa por 4 horas, a 60°C, e leitura em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 580 nm.

Os teores dos cátions, ânions e COD analisados na solução do solo das duas camadas avaliadas foram obtidos, originalmente, em mmol L⁻¹ de solução. Entretanto, como se dispunha dos valores de porosidade total e da curva de retenção de água no solo de cada amostra, estes teores foram corrigidos de acordo com o volume de solução e a densidade do solo e, portanto, pôde ser expressos com base no volume de solo (mmol dm⁻³), o que representa a disponibilidade real do volume de solução no solo, conforme o arranjo do sistema poroso solo-solução do solo.

Os resultados das análises dos atributos da solução do solo foram submetidos à análise de variância (p < 0,05) e de correlação de Pearson (p < 0,05), enquanto as médias dos valores dos atributos químicos da solução do solo das camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm foram comparados com o teste t pareado (p < 0,05).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. A acidez da solução do solo

Os valores de pH da solução do solo, na camada de 0 a 6,7 cm, variaram com a interação entre os fatores, e com o efeito isolado dos tipos de manejo e de rotações de culturas. Os resultados mostram que o efeito da interação foi mais expressivo na R3, cujo valor de pH foi maior no PD (5,2) e menor no PM (5,0). Os demais resultados podem ser observados na Tabela 1. Entre as camadas, os valores de pH diferiram no manejo PM e na rotação R3.

Tabela 1. Valores médios do pH da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7	CV(%)	6,8 - 20	CV(%)	
pH da solução					
PD	5,17a	3,1	5,11	2,4	0,73 ^{ns}
PC	5,04b	2,6	5,10	2,4	0,55 ^{ns}
PM	5,14ab	1,9	4,99	3,1	3,76*
R1	5,11ab	3,1	5,12	2,3	0,15 ^{ns}
R2	5,07b	2,8	5,11	3,2	0,51 ^{ns}
R3	5,18a	2,1	4,96	1,9	3,66*
Mata	4,97	0,9	4,86	2,6	1,13 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os maiores teores de Al da solução do solo foram observados no PC (Tabela 2). Entre as camadas houve diferenças nos teores de Al, somente no manejo PM, divergindo dos resultados mostrados por Meurer; Anghinoni (2012) e por Salet et al. (1999), que encontraram maior teor de Al na solução de solo na camada superficial do PD. Esta divergência foi verificada, embora o estudo deste último autor tenha sido realizado em experimento similar, no mesmo local do presente estudo, mas com dez anos sem calagem. Porém, o Al em solução não variou entre as camadas do PD, do PC e da mata, e o teor de Al trocável foi menor na camada de 0 a 6,7 cm destes tratamentos.

Tabela 2. Valores médios do alumínio da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7	CV(%)	6,8 - 20	CV(%)	
Al, µmol _c kg ⁻¹					
PD ⁽¹⁾	28c	6,6	48	7,2	1,25 ^{ns}
PC	76a	4,6	81	6,7	0,34 ^{ns}
PM	48b	7,0	69	8,8	3,30*
Rotações ⁽²⁾	51	12,0	66	14,2	1,55 ^{ns}
Mata	102	10,1	124	10,9	2,52 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

O menor teor de Al na solução do solo do PD, observado na camada de 0 a 6,7 cm, em comparação ao PC e ao PM podem ser atribuídos ao efeito complexante dos maiores teores de COD (SALET et al., 1999; ZAMBROSI et al., 2008; VIEIRA et al., 2009), além de maiores teores de cátions de reação básica (CIOTTA et al., 2002), uma vez que o pH pouco variou entre os tipos de manejo, ou entre as camadas. A correlação entre o Al trocável e o Al da solução do solo resultou em r = 0,05^{ns} (muito fraca), evidenciando que os tipos de manejo, proporcionam diferenças na complexação do Al da solução, em razão de diferenças nos valores de COD (SALET et al., 1999).

3.2. Cátions da solução do solo

No PD, os teores de Ca e de Mg da camada de 0 a 6,7 cm (Tabela 3) foram maiores que na de 6,8 a 20 cm, concordando com Salet et al. (1999) e Zambrosi et al. (2008). Os teores de Ca e de Mg foram distribuídos uniformemente entre as camadas do PC. A maior concentração de Ca e de Mg na camada superficial, embora o solo não tenha recebido calcário nos últimos 22 anos, pode ser atribuída à ciclagem destes cátions pelos resíduos culturais, que acumularam em superfície, e à menor complexação com PO₄⁻³, em razão do pH baixo (NOLLA; ANGHINONI, 2006).

Tabela 3. Valores médios do cálcio e magnésio da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7	CV(%)	6,8 - 20	CV(%)	
Ca, mmol dm ⁻³					
PD ⁽¹⁾	1,16a	5,1	0,42	6,1	8,79*
PC	0,49b	7,2	0,57	6,5	0,81 ^{ns}
PM	0,65b	4,5	0,50	7,5	1,46 ^{ns}
Rotações ⁽²⁾	0,75	11,8	0,50	12,2	2,72*
Mata	0,71	22,9	0,35	18,6	4,82*
Mg, mmol dm ⁻³					
Tratamentos ⁽³⁾	0,71	13,4	0,33	12,8	3,37*
Mata	1,06	15,5	0,54	19,4	6,35*

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si, e ⁽³⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

A correlação entre os valores de Ca e de Mg trocáveis e o da solução do solo resultou em coeficiente r de Ca = 0,42** (moderado) e de Mg = 0,72*** (forte), diferentemente do verificado com o Al. Silva; Bohnen (2006) verificaram correlação entre Ca e Mg da solução e do solo mas não encontraram diferenças entre os teores em relação ao tipo de manejo do solo.

Os maiores teores de K da solução do solo foram observados no PD e os menores no PC, o que coincide com o observado por Salet et al. (1999). Em todos os tratamentos houve diferenças entre o teor de K nas camadas avaliadas (Tabela 4). Os resultados sugerem que, nos manejos onde a camada compactada não tem aspecto maciço (PC e PM), pode ter ocorrido maior absorção do nutriente da solução, e isto foi mais eficiente nos tipos de rotação com quatro ou mais espécies. Como as doses de KCl aplicadas nos últimos cinco anos não foram altas (total de 60 kg de K₂O nas duas safras), a lixiviação deste cátion não seria, portanto, expressiva, conforme observaram Della Flora et al. (2007). Além disso, no PD, há restrições na permeabilidade do solo, o que pode estar favorecendo acúmulo de K na camada superficial, embora os maiores teores de COD possam facilitar a lixiviação (GEBRIM et al., 2008).

Tabela 4. Valores médios do potássio da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				
	0 - 6,7		6,8 - 20		Valor de t
	CV(%)	K, mmol dm ⁻³	CV(%)	K, mmol dm ⁻³	
PD ⁽¹⁾	0,93a	5,2	0,48	5,8	3,42*
PC	0,43b	7,5	0,26	5,7	2,88*
PM	0,57ab	5,6	0,38	8,6	2,09*
Rotações ⁽²⁾	0,64	11,9	0,37	12,4	4,36*
Mata	0,12	24,3	0,06	10,2	4,19*

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

O valor do coeficiente de correlação obtido entre o teor de K extraível do solo e o da K da solução do solo foi $r = 0,62***$ (forte). Este alto valor de r indicou que os teores de K da solução foram dependentes do K extraível no solo. A relação de troca entre o K⁺ e o N-NO₃⁻ na absorção do nitrato pelas raízes, que é abundante na solução do solo do PD, pode ter favorecido a ciclagem do K, conforme Yamada; Roberts (2005). Silva; Bohnen (2006) também encontraram correlação entre o K da solução e do solo e não encontraram diferenças entre os teores quanto ao tipo de manejo do solo PD e PC.

O teor de N-NH₄⁺ na camada de 0 a 6,7 cm interagiu entre os fatores estudados. O maior teor de N-NH₄⁺ da solução do solo foi observado na camada superficial da rotação R3 sob PD. Esta rotação produziu maior quantidade de MS e proporcionou maior teor de resíduos vegetais ao solo. Além disto, a inclusão da ervilhaca deve ter contribuído para isto, pois esta espécie é eficiente fornecedora de N (BODDEY et al., 2010).

O teor de N-NH₄⁺ também foi maior na camada superficial dos tipos de manejos conservacionistas, enquanto que, no PC, esses teores não diferiram entre as

camadas de solo avaliadas (Tabela 5). Os valores de Eh observados (275 a 430 mV) variaram dentro da faixa de solos oxidados, conforme Sousa et al. (2012). Nestas condições, o NH₄⁺ fica estável por pouco tempo, logo oxidando à NO₃⁻, quando o solo resseca (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1994).

Tabela 5. Valores médios do N-NH₄⁺ da solução do solo e resultados do teste t pareado comparando duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7		6,8 - 20		
	CV(%)	N-NH ₄ ⁺ , μmol dm ⁻³	CV(%)	N-NH ₄ ⁺ , μmol dm ⁻³	
PD	375a	13,6	202	10,6	2,64*
PC	84b	7,7	85	6,7	0,14 ^{ns}
PM	201b	7,6	172	7,0	1,26 ^{ns}
R1	125c	8,7	128	8,7	0,14 ^{ns}
R2	315a	9,2	188	7,6	1,82 ^{ns}
R3	221b	7,6	148	6,3	2,71*
Mata	430	11,5	142	6,2	4,72*

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

O maior teor de amônio na camada de 0 a 6,7 cm do manejo PD, deve ser oriundo de produtos da decomposição de maior quantidade de resíduos vegetal e da menor nitrificação. Araújo et al. (2004) observaram no manejo PD, condições edáficas mais favoráveis à retenção do N-NH₄⁺ do que no PC, havendo menor oxidação do NH₄⁺ na camada superior do solo manejado com PD. No presente trabalho, as condições de Eh na camada superficial dos tipos de manejo não foram diferentes, e nem nas da mata, que, assim como no PD, os teores de N-NH₄⁺ foram maiores. Portanto, estes maiores teores também podem ser atribuídos a maior quantidade de material orgânico ainda em decomposição.

As rotações com mais de quatro espécies produziram maior quantidade de matéria seca. Isto adicionou maior quantidade de matéria orgânica ao solo e favoreceu maior ciclagem de Ca, Mg, K, N (NH₄⁺) e Mn na camada superficial. De acordo com Amaral et al. (2004) e Silva et al. (2008), este efeito pode ser devido, principalmente, a ciclagem de nutrientes dos resíduos culturais de ervilhaca e de aveia branca.

O teor de Mn foi maior nas camadas superficiais do PD e da mata (Tabela 6). Porém, o teor de Mn trocável do solo, no presente trabalho, foi muito alto em todos os tratamentos, principalmente na mata. Os elevados teores de Mn, provavelmente, estão relacionados com os baixos valores de pH. Maiores teores de matéria orgânica (MOS) no solo deveriam reduzir a disponibilidade de Mn no solo, entretanto, isto não ocorre em solos com elevado conteúdo do elemento (MANSFELDT, 2004).

Não foram encontradas informações sobre níveis tóxicos de Mn em solução do solo, porém, Soratto et al. (2005) verificaram que teor de 16 mmol L⁻¹ de Mn em solução nutritiva não induziram toxidez ao feijoeiro, valor este maior que os obtidos no presente trabalho. Silva; Bohnen (2006) observaram correlação entre Mn da solução e do solo, porém não observaram diferenças entre o teor Mn entre tipo de manejo PD e PC.

Tabela 6. Valores médios do Mn^{2+} da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7		6,8 - 20		
	CV(%)	Mn, $\mu\text{mol dm}^{-3}$	CV(%)	Mn, $\mu\text{mol dm}^{-3}$	
PD ⁽¹⁾	86a	7,8	42	8,8	4,36*
PC	11c	8,7	11	7,0	0,13 ^{ns}
PM	43b	4,4	30	8,5	11,88*
Rotações ⁽²⁾	46	12,4	28	15,4	2,93*
Mata	68	6,6	79	2,5	1,98 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

3.3. Ânions da solução do solo

Os resultados mostrados na Tabela 7 indicam que o $N-NO_2^-$ não variou entre os tratamentos, porém houve diferenças entre ambas as camadas estudadas, ocorrendo em valores dentro da faixa de âmbito conhecido (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1994). Na mata, também houve diferenças entre os teores de $N-NO_2^-$ das camadas avaliadas.

Os resultados da Tabela 7 mostram que os teores de $N-NO_3^-$ na camada de 0 a 6,7 cm foram maiores no manejo PD, havendo diferença entre as camadas. Nos demais tratamentos, não houve diferença dos teores de $N-NO_3^-$ entre as camadas. Estes teores foram semelhantes aos valores máximos de solos com PD, relatados por Novais; Mello (2007).

Salet et al. (1999) observaram teores menores de $N-NO_3^-$ na solução do solo em relação ao observado neste trabalho. Os resultados desses autores também foram obtidos de amostras retiradas em condição de umidade do solo similares. O $N-NO_3^-$, principalmente, o adicionado por fertilizantes, de acordo com Silva et al. (2004), tende a concentrar mais na solução do solo, em relação aos demais ânions, em razão da elevada solubilidade desse composto iônico e isto explica a diferença entre os teores médios das duas camadas das rotações de culturas.

Tabela 7. Valores médios de $N-NO_2^-$ e $N-NO_3^-$ da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7		6,8 - 20		
	CV(%)	$N-NO_2^-$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$	CV(%)	$N-NO_3^-$, mmol dm^{-3}	
Tratamentos ⁽¹⁾	11	11,6	9	13,7	3,25*
Mata	8	5,3	11	9,3	4,47*
PD ⁽²⁾	2,71a	5,1	1,60	6,4	3,24*
PC	1,81b	6,2	1,77	6,4	0,12 ^{ns}
PM	2,02b	5,1	1,74	7,2	0,92 ^{ns}
Rotações ⁽³⁾	2,18	6,3	1,70	6,8	2,26*
Mata	1,73	13,7	1,46	13,2	0,02 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si; ⁽²⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽³⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

O teor de $N-NO_3^-$ da solução do solo com mata encontra-se dentro da faixa de âmbito conhecido, que, de acordo com os valores relatados por Novais; Mello (2007), varia de 0 a 7,8 mmol L^{-1} (ou cerca de 0 a 2,8 mmol dm^{-3} de solo com umidade na capacidade de campo). Estes elevados teores de N do presente estudo podem ser explicados pela ciclagem da matéria orgânica da mata, que ocorre em elevada quantidade, além da contribuição da enxurrada proveniente de áreas de lavoura adjacentes e a montante da mata (GUADAGNIN et al., 2005). Nas rotações R2 e R3, a ervilhaca, possivelmente contribuiu com mais N em relação às outras espécies, e isto resultou em maiores teores de N na forma nítrica ao sistema. O teor de NO_3^- nas rotações não variou.

O teor de $S-SO_4^{2-}$ não diferiu entre as duas camadas, nem entre os tipos de manejo, mas diferiram entre as rotações, na camada de 6,8 a 20 cm. Nesta camada, o teor de $S-SO_4^{2-}$ foi maior na rotação R2 (Tabela 8). Os teores observados desse ânion foram próximos à média dos valores encontrados por Miranda et al. (2006) em duas camadas de solo de lavoura de cafeeiro. Os maiores valores de $S-SO_4^{2-}$ encontrados na solução do solo da mata podem ser atribuídos parte à decomposição da matéria orgânica e parte a emissões industriais, uma vez que a área do experimento encontra-se próxima a indústrias de fundição.

Tabela 8. Valores médios do $S-SO_4^{2-}$ da solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7		6,8 - 20		
	CV(%)	$S-SO_4^{2-}$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$	CV(%)	$S-SO_4^{2-}$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$	
Manejos ⁽¹⁾	37	13,6	34	10,8	0,78 ^{ns}
R1 ⁽²⁾	29	5,4	22c	6,6	2,03 ^{ns}
R2	47	8,3	46a	7,6	0,09 ^{ns}
R3	34	6,5	34b	6,8	0,08 ^{ns}
Mata	135	16,0	54	13,1	4,77*

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, não diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

O teor de SO_4^{2-} foi maior nas rotações R2 e R3, não diferindo entre as camadas, e, em geral, maiores na mata. Os menores teores foram observados na rotação R1, na qual a cultura da soja é cultivada todo ano, e, como esta cultura é extratora de S da solução, os teores na solução foram menores (VITTI et al., 2006). De acordo com Silva et al. (1999), o enxofre na forma de SO_4^{2-} é rapidamente ciclado no agrossistema e facilmente lixiviado.

Os valores de $P-PO_4^{3-}$ obtidos não variaram entre os tratamentos, nem entre as camadas estudadas (Tabela 9). Porém, foram maiores que os encontrados por Novais; Mello (2007) e por Salet et al. (1999), embora se encontrem dentro da faixa de âmbito conhecido segundo Fassbender; Bornemisza (1994). O valor do coeficiente de correlação entre os teores de P extraível do solo e o PO_4^{3-} da solução foi 0,34^{ns} (fraco), o que evidenciou influência da fase sólida do solo, na fixação do P. De acordo com Zambrosi et al. (2008), o $P-PO_4^{3-}$ tem baixa mobilidade no solo e grande interação com a fase sólida. A dificuldade de se avaliar o $P-PO_4^{3-}$ em solução do solo reside no fato de que é um ânion de detecção complexa (o nível mínimo de detecção no

cromatógrafo era $0,1 \text{ mg L}^{-1}$), mas que tem a maior afinidade com a fase sólida entre todos os ligantes inorgânicos ou ácidos (AMARAL; VETTORAZZO, 2005).

Tabela 9. Valores médios do P-PO_4^{3-} da solução do solo e resultados do teste t pareado comparando duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas.

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7	CV(%)	6,8 - 20	CV(%)	
	P- PO_4^{3-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$				
Tratamentos ⁽¹⁾	5	11,4	5	13,6	0,41 ^{ns}
Mata	4	8,8	4	9,7	0,80 ^{ns}

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os elevados teores de P extraível nas camadas superficiais do PD e do PM não influenciaram os teores de P na solução do solo, conforme já havia constatado Zambrosi et al. (2008), ao relatarem que os teores das formas de P na solução do solo variam com o pH da solução, sendo que este último atributo não variou no presente estudo. Silva; Bohnen (2006), por outro lado, encontraram correlação entre P do solo e da solução.

Os teores de COD na solução do solo foram maiores na camada superficial do PD, em relação ao PC e ao PM (Tabela 10), sendo que na outra camada avaliada, este atributo também foi maior no PD. Os teores de COD, em função das rotações, foram inferiores aos da mata, porém, as rotações com mais de quatro espécies (R2 e R3) mostram, no PD, maiores valores de COD, em comparação a rotação R1 (5.831 kg ha^{-1}).

Tabela 10. Valores médios do carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

Médias	Camada (cm)				Valor de t
	0 - 6,7	CV(%)	6,8 - 20	CV(%)	
	COD - Carbono orgânico dissolvido, mmol dm^{-3}				
PD	1,93a	15,8	1,24	13,6	3,50*
PC	0,56b	5,3	0,63	5,4	1,11 ^{ns}
PM	0,95b	6,7	0,83	6,3	1,69 ^{ns}
R1	0,90	8,1	0,79	6,1	0,92 ^{ns}
R2	1,11	7,6	0,82	5,9	1,70 ^{ns}
R3	1,42	9,0	1,09	7,5	1,39 ^{ns}
Mata	2,15	21,6	2,66	10,6	1,24 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

As rotações R2 e R3 produzirem mais MS (9.987 e $10.195 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente) e, portanto, contribuíram com maior teor de C para a solução (BODDEY et al., 2010). Vieira et al. (2009) encontraram diferenças nos teores de COD, conforme o tipo de rotação de culturas, sendo maiores nas camadas de 0 a 5 cm das rotações com espécies leguminosas, valores maiores que o do presente estudo. Entretanto, estes autores utilizaram um filtro de maior diâmetro de poros e somente uma filtragem quando da extração da solução, o que explica as diferenças.

O menor valor de COD na camada de 0 a 6,7 cm foi observado no PC. Possivelmente, isso é devido ao revolvimento do solo (MIRANDA et al., 2006). Os valores

de COD encontrados nos manejos PD e PC foram semelhantes aos relatados por Salet et al. (1999), na mesma área experimental, em estudo efetuado 10 anos antes do presente trabalho, em experimento similar. Assim, pode-se inferir que não houve aumento do COD da solução do solo, após mais de uma década de manejo do solo com PD. Entretanto, no trabalho de Salet et al. (1999), o teor de MOS no PD, de ambas as camadas foi maior que o do PC e maiores que as observadas no presente estudo.

A rotação R3 produziu anualmente, maior teor de biomassa, o que pode ter resultado também em maior teor de COD na solução do solo desta camada. Além disso, esta rotação contém aveia branca e, de acordo com Cassiolato et al. (2000), algumas cultivares dessa espécie exsudam no solo, substâncias que aumentam o pH e o teor de Ca trocável, diminuindo o teor de Al trocável, até 20 cm de profundidade.

Quando se estimou a correlação entre os valores de C do solo e os teores de COD foi obtido um valor do coeficiente $r = 0,46^{***}$. O valor moderado desse coeficiente indica a contribuição da MOS para os teores de C dissolvido na solução, porém, Silva; Bohnen (2006) não encontraram correlação entre o carbono do solo e da solução.

4. CONCLUSÕES

Os manejos sistema plantio direto e escarificação favorecem maiores valores de Ca, K, NH_4^+ , NO_3^- e carbono orgânico dissolvido na solução do solo enquanto que o preparo convencional propiciam maiores valores de pH e índice SMP (Shoemaker, Mc Lean e Pratt), na camada de 0 a 6,7 cm independentemente da rotação de culturas.

Na solução do solo, o sistema plantio direto, em qualquer sistema de rotação de cultura, favorece maiores valores de carbono orgânico dissolvido e menor teor de Al, e ameniza a toxidez de Al, em relação aos demais tipos de manejo de solo.

5. REFERÊNCIAS

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.2, p.359-367, mar./abr. 2004.

AMARAL, F. C. S.; VETTORAZZO, S. C. **Especiação iônica da solução percolada de um solo tratado com lama de cal**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 21p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Solos, n.70).

ARAÚJO, A. R. et al. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, n.3, p.537-541, maio/jun. 2004.

BODDEY, R. M. et al. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Malden, v.16, n.2, p.784-795, fev. 2010.

CANCÉS, B. et al. Metal ions speciation in a soil and its solution: experimental data and model results. **Geoderma**, Amsterdam, v.113, n.2, p.341-355, maio 2003.

- CASSIOLATO, M. E. et al. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.43, n.5, p.533-536, dez. 2000.
- CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.1.055-1.064, jul./ago. 2002.
- DELLA FLORA, L. P. et al. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um Cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1.591-1.598, nov./dez. 2007.
- FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina**. 2.ed. San José: IICA, 1994. 420p.
- GEBRIM, F. O. et al. Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camas de aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.2.255-2.267, nov./dez. 2008.
- GLOAGUEN, T. V. et al. Composição química da solução do solo nas diferentes classes de poros do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1.105-1.113, set./out. 2009.
- GUADAGNIN, J. C. et al. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.2, p.277-286, maio/abr. 2005.
- MANSFELDT, T. Redox potential of bulk soil and soil solution concentration of nitrate, manganese, iron, and sulfate, in two Gleysols. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v.167, n.1, p.7-16, fev. 2004.
- MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 5.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p.87-113.
- MIRANDA, J. et al. Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.633-647, jul./ago. 2006.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p.955-963, nov./dez. 2006.
- NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007, p.133-204.
- PÉREZ, D. V.; CAMPOS, R. C. **Especiação em solos: aspectos gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 33p. (Embrapa Solos. Documentos; n. 47).
- SALET, R. L. et al. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, n.1, p.9-13, jan./jun. 1999.
- SILVA, C. A. et al. Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.9, p.1.679-1.689, set. 1999.
- SILVA, E. P. et al. Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo à geada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.10, p.1.257-1.265, out. 2008.
- SILVA, L. A. et al. Por que todos os nitratos são solúveis? **Química Nova**, São Paulo, v.27, n.6, p.1.016-1.020, nov./dez. 2004.
- SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Relações entre nutrientes na fase sólida e solução de um latossolo durante o primeiro ano nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.4, p.1.164-1.171, jul./ago. 2006.
- SORATTO, R. P. et al. Resposta de quatro cultivares de feijão ao manganês em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.11, n.2, p. 235-240, abr./jun. 2005.
- SOUSA, R. O. et al. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 5.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p.178-201.
- SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2.ed. San Diego: Academic Press, 352p. 2003.
- VIEIRA, F. C. B. et al. Organic matter kept Al toxicity in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilization. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood v.47, n.7, p.707-714, nov. 2009.
- VITTI, G. C. et al. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006, p.299-325.
- WOLT, J. D. **Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 345p.
- YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. 5.ed. Piracicaba: Ed. Potafós. 2005. 841p.
- ZAMBROSI, F. C. B. et al. Liming and ionic speciation of an oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, n.2, p.190-203, mar./abr. 2008.