

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

Rogério Gonzatto

**EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO POR GRAMÍNEAS EM
FUNÇÃO DO MODO DE APLICAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS NO
SOLO E DO USO DE INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO**

Santa Maria, RS
2016

Rogério Gonzatto

**EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO POR GRAMÍNEAS EM FUNÇÃO DO
MODO DE APLICAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS NO SOLO E DO USO DE
INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**

Orientador: Prof. Dr. Celso Aita

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gonzatto, Rogério

Eficiência de uso do nitrogênio por gramíneas em função do modo de aplicação de dejetos suínos no solo e do uso de inibidor de nitrificação / Rogério Gonzatto.-2016.
85 f.; 30cm

Orientador: Celso Aita

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2016

1. Injeção de Dejetos 2. Dicianodiamida 3. Produtividade de Culturas 4. Plantio Direto I. Aita, Celso II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Rogério Gonzatto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: rogonzatto@gmail.com

Rogério Gonzatto

**EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO POR GRAMÍNEAS EM FUNÇÃO DO
MODO DE APLICAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS NO SOLO E DO USO DE
INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**

Aprovado em 01 de abril de 2016:

Celso Aita, Dr.
(Presidente/Orientador)

Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)

Frederico Costa Beber Vieira, Dr. (UNIPAMPA)

Ezequiel Cesar Carvalho Miola, Dr. (FURG)

Stefen Barbosa Pujol, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2016

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo a Deus por me fazer persistir e acreditar que é possível.

Aos meus pais Valdir e Eni pelos ensinamentos, amor, incentivo, carinho e educação. Aos meus irmãos Eduardo e Débora pela convivência, apoio e companheirismo. Aos sobrinhos Maximiliano, Gracieli, João Augusto e Maria Eduarda. Perdão pelo tempo que não passei com vocês. Amo muito vocês!

Aos professores Celso Aita e Sandro José Giacomini pela orientação e auxílio durante a execução deste trabalho.

Aos pesquisadores e técnicos do “Agriculture and Agri-Food Canada” Martin Chantigny, Philippe Rochette, Denis Angers, Norman Bertrand e Johanne Tremblay pela acolhida, ensinamentos e confiança (merci beaucoup).

A minha querida Caciara pelo companheirismo, pelos valiosos conselhos e por dividir a sua infinita serenidade. Sou eternamente grato por fazer acreditar em mim mesmo.

Aos amigos e pós-graduandos do LABCEN, Ezequiel (Keko), Rafael (Cantú), Daniela Santos, Diego Giacomini, Felipe Tonetto, Alexandre Desbessel, Luana Monteiro e Tiago Ferreira. Todos vocês de alguma forma ajudaram para que este trabalho fosse realizado. A todos os colegas do PPGCS.

Aos grandes colegas/amigos/irmãos Stefen Pujol, Fabiano (Alemão), Tércio e Patrick pela amizade, auxílio, apoio, palavras de motivação, pela calma em ensinar e pelas caronas trocadas, além das boas risadas e cervejas de fim de tarde.

Aos amigos e bolsistas do LABCEN, Géssica, Ana Clara, Thaís, Thomáz, Emerson, Francielle e Juliano. Sem vocês este trabalho não teria sido realizado. A qualidade de nosso trabalho reflete a nossa união. Sou grato a cada um de vocês que não mediram esforços para a melhor execução do trabalho.

Aos companheiros do “Grupo do professor Sandro”, do futebol e do churrasco.

Aos amigos e ex-colegas pela amizade e conselhos.

Aos funcionários e amigos do Departamento de Solos.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso.

Ao CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Não seria nada sem um pouco de cada um de vocês!

Querem que vos ensine o modo de chegar à ciência verdadeira? Aquilo que se sabe, saber que se sabe; aquilo que não se sabe, saber que não se sabe; na verdade é este o saber.

(Confúcio)

Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.

(Dave Weinbaum)

Não há saber mais ou saber menos: Há saberes diferentes.

(Paulo Freire)

RESUMO

EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO POR GRAMÍNEAS EM FUNÇÃO DO MODO DE APLICAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS NO SOLO E DO USO DE INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO

AUTOR: Rogério Gonzatto

ORIENTADOR: Celso Aita

O efeito da injeção de dejetos líquidos de suínos (DLS) no solo e do uso de inibidores de nitrificação, como a dicianodiamida (DCD), sobre as perdas gasosas de N para atmosfera é melhor documentado do que o efeito destas práticas sobre a eficiência de uso do nitrogênio (EUN) e a produtividade das culturas. O objetivo do presente trabalho foi avaliar como o modo de aplicação (injeção subsuperficial vs aplicação superficial) de DLS no solo em sistema de plantio direto (SPD) e a adição de DCD aos DLS afetam a recuperação do N amoniacal ($N-NH_4^+$) dos DLS no sistema solo-planta, a EUN e a produtividade em uma sucessão de gramíneas (milho/aveia-trigo). Dois estudos foram conduzidos a campo na Universidade Federal de Santa Maria, em um Argissolo Vermelho Alumínico úmbrico, no delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições dos seguintes tratamentos: DLS aplicados na superfície do solo (DLSs), DLSs + DCD, DLS injetados (DLSi), DLSi + DCD, testemunha e adubação mineral (NPK) em superfície. Os estudos iniciaram em dezembro de 2011 com a aplicação dos tratamentos no milho, sendo o primeiro finalizado em junho de 2013 e o segundo em dezembro de 2015, ambos na cultura do trigo. A aplicação dos DLS foi realizada de forma manual com regadores, enquanto a injeção foi mecanizada em sulcos espaçados 35 cm entre si, na profundidade de 8-11 cm. A dose de DCD utilizada foi de 10 kg ha⁻¹, misturada aos dejetos instantes antes da aplicação no solo. Para o primeiro estudo a fração amoniacal dos DLS foi enriquecida em ¹⁵N e aplicado em microparcelas (1,40 x 1,60 m) demarcadas dentro das parcelas principais do experimento (5,25 x 6,0 m) para avaliar o efeito do modo de aplicação e da adição de DCD sobre o destino dessa fração no sistema solo-planta. No segundo estudo foram colhidas plantas nas parcelas principais para determinar o efeito dos tratamentos sobre a EUN e a produtividade das culturas. Comparada à aplicação em superfície, a injeção dos DLS no solo mostrou-se mais eficiente quando seguida por condições de baixa umidade do solo, aumentando em 22 kg N ha⁻¹ a recuperação de $N-NH_4^+$ dos DLS no milho. A DCD, no entanto, foi mais eficiente em situações com maior umidade do solo, aumentando em 24 kg N ha⁻¹ a recuperação de $N-NH_4^+$ no milho. Além disso, a eficiência da injeção foi maximizada quando combinada com DCD, aumentando em 21% a retenção de $N-NH_4^+$ no sistema solo-planta. No segundo estudo, a injeção também aumentou a recuperação aparente de N (21%), a eficiência agrônômica do N (33%) aplicado com os DLS e a produtividade das culturas (10%) em comparação à aplicação superficial. O uso da DCD não teve efeito significativo em todos os cultivos, embora no trigo/2013 tenha melhorado os atributos avaliados. O melhor desempenho das culturas com a injeção de DLS, quanto a EUN foi relacionado, principalmente, à eficiência dessa prática em reduzir as perdas de N por volatilização de amônia (NH₃), garantindo a maior disponibilidade de N às plantas. A DCD, no entanto, parece ser mais eficiente quando sua aplicação é seguida por períodos de umidade elevada, que favoreçam as perdas de N por desnitrificação ou lixiviação de nitrato (NO₃⁻), e/ou com baixas temperaturas que aumentam a longevidade do produto no solo. Diante desses resultados, a injeção dos DLS no solo em SPD, constitui uma alternativa de manejo promissora, em relação à aplicação dos DLS na superfície do solo, enquanto o uso de DCD carece por mais estudos avaliando seus efeitos sobre a EUN pelas culturas, variando as condições de solo e clima.

Palavras-chave: Injeção de Dejetos. Dicianodiamida. Produtividade de Culturas. Plantio Direto.

ABSTRACT

NITROGEN USE EFFICIENCY OF GRASSES AS AFFECTED BY THE PIG SLURRY APPLICATION MODE AND USE OF NITRIFICATION INHIBITOR

AUTHOR: ROGÉRIO GONZATTO
ADVISOR: CELSO AITA

The effect of pig slurry (PS) injection into the soil and nitrification inhibitor use such as dicyandiamide (DCD) on gaseous N losses to the atmosphere is better documented than the effect of these practices on nitrogen use efficiency (NUE) and crop productivity. The aim of this work was to evaluate how the PS application method (shallow injection *vs* surface broadcasting) in no-till (NT) and DCD addition to PS affects the recovery of PS ammonium N ($\text{NH}_4\text{-N}$) in the soil-plant system, NUE and productivity in a succession of grasses (corn/oat-wheat). Two studies were performed in the field at Universidade Federal de Santa Maria, in a Typic Paleudult. The experimental design was in randomized blocks with four repetitions of the following treatments: surface broadcast of pig slurry (PSs), PSs + DCD, injected PS (PSi), PSi + DCD, and control and surface application of mineral (NPK). Studies began in December 2011, with the first one finalized in June 2013 and the second in December 2015. In the first study, the PS ammonium fraction ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was ^{15}N enriched to follow the fate of this fraction in the soil-plant system. Compared with the broadcast application, PS injection into the soil was more effective when followed by low soil moisture conditions, increasing in 22 kg N ha^{-1} the recovery of PS $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in corn. However, the DCD was more efficient in situations with higher soil moisture, increasing in 24 kg N ha^{-1} the recovery of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in corn. In addition, PS injection efficiency was improved when combined with DCD, increasing in 21% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ retention in the plant-soil system. In the second study, PS injection also increased the apparent recovery of N (21%), agronomic efficiency of N (33%) and crop productivity (10%) compared to surface application. DCD use did not have significant effect on all crops, although, on the other hand, its use in wheat/2013 improved the evaluated attributes. The best performance of crops with PS injection as NUE is related mainly to the efficiency of this practice to reduce N losses by ammonia (NH_3) volatilization, ensuring greater N availability for uptake by crops. The DCD, nevertheless, seems to be more effective when its application is followed by periods of high humidity, which favour N losses by denitrification or nitrate leaching (NO_3^-), and/or low temperatures that increase the longevity of the product in the soil. In conclusion, these results indicated that PS injection into the soil in NT is a promising alternative management for PS surface broadcasting, while the use of DCD requires further studies evaluating its effect on NUE by crops varying the soil and local weather conditions.

Keywords: Slurry Injection. Dicyandiamide. Crop Yield. No-Till.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

Figura 1 - Scheme of an experimental plot with the location and dimension of the microplots after the complete four-crop rotation and four applications of pig slurry. Where: Corn/2011, corn planted in summer 2011; Oat/2012, oat planted in winter 2012; Corn/2012, corn planted in summer 2012; Wheat/2013, wheat planted in winter 2013.....48

Figura 2 - Crop uptake (grain + crop residues) of labelled (pig slurry-derived $\text{NH}_4\text{-N}$) and unlabelled (soil-derived N and PS organic N) in Corn/2011 (a), Oat/2012 (b), Corn/2012 (c) and Wheat/2013 (d) after surface broadcast of PS without (PSs) or with dicyandiamide (PSs + DCD), or injection without (PSi) or with dicyandiamide (PSi + DCD). Vertical bars indicate standard errors (n=4). Oat was harvested at a vegetative stage (flowering) and returned to soil as a green manure49

ARTIGO II

Figura 1 - Precipitação (P) e irrigação mensal, temperatura (T) média diária durante o período experimental (2011 - 2015) e média histórica dos últimos 30 anos (1981-2010). As letras e setas indicam o mês de instalação de cada experimento e a cultura semeada (M: milho, A: aveia e T: trigo).....72

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

Tabela 1 - Selected characteristics of the soil at the experimental site	42
Tabela 2 - Mean air temperature (maximum and minimum), precipitation, and irrigation for various periods during the experiment (2011 to 2013).....	43
Tabela 3 - Selected characteristics and application rates for pig slurry applied to each phase of the 2-yr crop succession	44
Tabela 4 - Uptake of recently-applied pig slurry $\text{NH}_4\text{-N}$ in aboveground plant parts (grain and crop residues) at harvest for Corn/2011, Oat/2012, Corn/2012 and Wheat/2013 as a function of PS application mode and use of the nitrification inhibitor dicyandiamide	45
Tabela 5 - Proportions of residual pig slurry $\text{NH}_4\text{-N}$ recovered in the plant-soil system at the end of experiment (harvest of wheat)	46
Tabela 6 - Global effects of pig slurry (PS) application mode and use of DCD on the recovery of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ applied to the whole crop succession	47

ARTIGO II

Quadro 1 - Principais características dos dejetos líquidos de suínos (DLS) (dados expressos em base úmida), dose de DLS e quantidades de N, fósforo (P) e potássio (K) aplicadas com os dejetos e com o fertilizante mineral em cada cultura	73
Quadro 2 - Calendário de atividades durante o período experimental.....	74
Quadro 3 - Produtividade, acúmulo de N, eficiência agrônômica do N (EAN) e recuperação aparente do N (RAN) pelo milho após a aplicação superficial e injetada de dejetos líquidos de suínos no solo, com e sem o inibidor de nitrificação dicianodiamida, em plantio direto.....	75

Quadro 4 - Produtividade, acúmulo de N, eficiência agrônômica do N (EAN) e recuperação aparente do N (RAN) pela aveia e trigo após a aplicação superficial e injetada de dejetos líquidos de suínos no solo, com e sem o inibidor de nitrificação dicianodiamida, em plantio direto.....76

Quadro 5 - Efeito cumulativo da aplicação superficial e injetada de dejetos líquidos de suínos, com e sem dicianodiamida sobre a produtividade, nitrogênio acumulado, eficiência agrônômica do N (EAN) e recuperação aparente do N (RAN) pelo milho, aveia e trigo em plantio direto.....77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2 HIPÓTESES E OBEJETIVOS	15
2.1 HIPÓTESES	15
2.2 OBJETIVO GERAL.....	15
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 ARTIGO I - INJECTION AND NITRIFICATION INHIBITOR IMPROVE THE RECOVERY OF PIG SLURRY AMMONIUM NITROGEN IN GRAIN CROPS IN BRAZIL	16
3.1 Resumo	16
3.2 Introdução.....	17
3.3 Material e Métodos.....	19
3.4 Resultados e Discussões	26
3.5 Conclusão	33
3.6 Referências	34
4 ARTIGO II - COMO A INJEÇÃO DE DEJETOS DE SUÍNOS NO SOLO E A DICIANODIAMIDA AFETAM A EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO E A PRODUTIVIDADE DE GRAMÍNEAS EM PLANTIO DIRETO.....	50
4.1 Resumo	50
4.2 Introdução.....	52
4.3 Material e Métodos.....	54
4.4 Resultados e Discussões	57
4.5 Conclusões.....	64
4.6 Referências	64
5 DISCUSSÃO GERAL	78
6 CONCLUSÕES GERAIS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO GERAL

A suinocultura é uma atividade de grande importância econômica e social para o setor agropecuário brasileiro. Dados recentes mostram o Brasil como o quarto maior produtor e exportador de carne suína do mundo (ABIPECS, 2015). Essa atividade está concentrada, principalmente, em regiões declivosas dos três estados da Região Sul e com forte expansão para o Sudoeste do País (KUNZ et al., 2009). A suinocultura praticada atualmente nessas regiões caracteriza-se, sobretudo, pela geração de grandes volumes de dejetos, perfazendo cerca de 300 milhões de litros diários (OLIVEIRA, 2003), os quais são manejados na forma líquida e são ricos em N amoniacal (YAGUE, QUÍLEZ, 2010).

O principal destino dos dejetos líquidos de suínos (DLS) produzidos é o seu uso como fertilizante às culturas, pois além de ser um resíduo orgânico disponível na propriedade, ele possui elevado potencial fertilizante, conforme já evidenciado pela pesquisa e reconhecido pelos produtores. Após ser distribuído no solo, o N amoniacal dos DLS está disponível à absorção pelas plantas, mas também sofre diversas transformações mediadas por microrganismos específicos, as quais podem resultar em perdas do nutriente para o ambiente, comprometendo a produtividade das culturas, especialmente das gramíneas, cuja demanda em N é elevada.

Uma fração do N amoniacal dos DLS pode ser imobilizada pelos microrganismos do solo (GIACOMINI et al., 2009), fixada nas argilas (CHANTIGNY et al., 2014) ou perdida para a atmosfera nas formas gasosas de amônia (NH_3) (ROCHETTE et al., 2001) e óxido nitroso (N_2O), durante e após a nitrificação (BAGGS, 2011). Também podem ocorrer perdas/transferência de N na forma de amônio (NH_4^+), para as águas de superfície, e de nitrato (NO_3^-) para águas de sub superfície, por escoamento e lixiviação (GIACOMINI; AITA, 2006; VELTHOF; MOSQUERA, 2011). A magnitude da perda de N por essas diferentes vias irá depender das condições de solo e clima que irão predominar após a aplicação dos DLS.

Com o surgimento e a rápida expansão do sistema plantio direto (SPD) no Sul do Brasil é cada vez mais frequente a aplicação dos DLS na superfície do solo, sobre os resíduos culturais. Nessa condição, onde não há incorporação dos DLS ao solo, potencializam-se os problemas de contaminação ambiental, especialmente do ar por emissões gasosas de N na forma de NH_3 e da água por nutrientes e microrganismos fecais, além de reduzir o seu potencial fertilizante as culturas. Quando os dejetos são aplicados em superfície, a volatilização de NH_3 representa uma das principais vias de perda de N para atmosfera, podendo atingir 70% do N total aplicado (THOMPSON; MEISINGER 2002). A estratégia

mais eficiente no controle da volatilização é a incorporação dos dejetos no solo (HUIJSMANS et al., 2003; DELL et al., 2012). No entanto, essa prática é incompatível com o SPD, pois esse sistema não permite o revolvimento do solo.

Uma das alternativas para aplicar os DLS com a mínima mobilização do solo em SPD consiste na sua injeção em subsuperfície. Ao reduzir significativamente as perdas de N por volatilização de NH_3 (WEBB et al., 2010; GONZATTO 2012, AITA et al., 2014), a injeção aumenta a recuperação do N dos DLS por gramíneas (FEDEROLF et al., 2016). No entanto, se por um lado, a injeção dos DLS no solo protege a fração amoniacal destes da volatilização de NH_3 , por outro, essa prática pode aumentar a perda de N na forma gasosa de N_2O (DELL et al., 2011; GONZATTO, 2012, AITA et al., 2014). Isso porque, no interior dos sulcos de injeção dos DLS estão concentrados N, C solúvel e água, o que pode favorecer a produção de N_2O por bactérias nitrificadoras e, principalmente, desnitrificadoras (DELL et al., 2011; AITA et al., 2014).

A redução da taxa de oxidação do N amoniacal dos dejetos até NO_3^- durante a nitrificação constitui uma alternativa promissora para mitigar a produção e emissão de N_2O (ABALOS et al., 2014; HALVORSON et al., 2014). Isso pode ser obtido através da adição aos dejetos de inibidores de nitrificação (IN), com destaque para a dicianodiamida (DCD), a qual possui ação bacteriostática (SUBARAO et al., 2006) retardando a oxidação do NH_4^+ para nitrito (NO_2^-), na primeira etapa da nitrificação, sem interferir na oxidação subsequente deste para NO_3^- (SINGH; VERMA, 2007). Ao manter por mais tempo o N dos dejetos na forma de NH_4^+ , os IN reduzem a mobilidade do N no solo, reduzindo as perdas de N por lixiviação de NO_3^- (CARNEIRO et al., 2011) e as emissões de N_2O , tanto durante a nitrificação do N amoniacal dos DLS, como durante a desnitrificação (AITA et al., 2014), melhorando com isso o fornecimento de N às plantas.

Embora existam informações sobre a eficiência da injeção dos DLS e do uso de IN na obtenção de benefícios econômicos e ambientais (MAGUIRE et al., 2011; DEEL et al., 2011; AITA et al., 2014), ainda há muitas dúvidas sobre os efeitos de sua utilização na dinâmica da fração amoniacal do N aplicado com os DLS, sobretudo a médio e longo prazo. Alguns estudos mostram que o real valor fertilizante dos DLS e a eficiência das estratégias adotadas para redução das perdas de N tornam-se evidentes apenas após estudos de média e/ou longa duração (SCHRÖDER 2005; CELA et al., 2011; ZHANG et al., 2012). Diante da necessidade de melhor estudar o destino do N aplicado com DLS no sistema solo-planta-atmosfera, técnicas como as que utilizam o isótopo estável ^{15}N tem se mostrado adequadas para este fim (JENSEN et al., 2000; SØRENSEN, THOMSEN 2005; HOEKSTRA et al., 2010). O método

consiste no enriquecimento dos dejetos com ^{15}N , o que permite distinguir a origem do N acumulado pela planta, separando entre N-solo e N-fertilizante (LARA CABEZAS et al., 2000; SØRENSEN & AMATO, 2002), o que pode auxiliar no manejo da adubação nitrogenada.

Apesar dos avanços no conhecimento sobre a dinâmica do N dos DLS no sistema solo-planta-atmosfera ainda existem poucos estudos em nível mundial avaliando com maior precisão como a injeção dos DLS no solo e o uso de DCD podem afetar a eficiência de uso do N dos DLS e a produtividade das culturas. Além disso, a maior parte das informações nessa área são oriundas de regiões de clima temperado. Essa carência é ainda maior no caso do Brasil, apesar da grande importância da suinocultura para o país e do uso predominante dos DLS em SPD e em condições subtropicais. É preciso intensificar os estudos envolvendo, principalmente, a contribuição da fração amoniacal dos dejetos como fertilizante e seu impacto sobre a produtividade das culturas.

2 HIPÓTESES E OBEJETIVOS

2.1 HIPÓTESES

a) A injeção subsuperficial dos DLS no solo em SPD aumenta a recuperação do N amoniacal dos DLS e a produtividade da sucessão milho/aveia-trigo, em relação à aplicação superficial.

b) A adição do inibidor de nitrificação DCD aos DLS melhora o aproveitamento do N amoniacal destes pela sucessão milho/aveia-trigo, principalmente quando combinada com a injeção dos DLS no solo.

2.2 OBJETIVO GERAL

Comparar a aplicação superficial dos DLS com a sua injeção subsuperficial no solo, associadas ou não ao uso do inibidor de nitrificação DCD, quanto à eficiência de uso do N (EUN), a produtividade da sucessão aveia-trigo/milho e a recuperação do N amoniacal aplicado com os dejetos em SPD.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar como a injeção e a aplicação superficial de DLS em um Argissolo, associadas ou não à DCD, afetam os seguintes aspectos na sucessão milho/aveia/trigo:

- a) Recuperação do N amoniacal dos DLS pelas plantas e seu efeito residual no solo;
- b) Produtividade e EUN pelas plantas.

3 ARTIGO I

Injection and nitrification inhibitor improve the recovery of pig slurry ammonium nitrogen in grain crops in Brazil¹

Abbreviations list: NT, no-till; PS, pig slurry; DCD, dicyandiamide; PSs, surface broadcast of PS; PSi, injection of PS; USDA, United States Department of Agriculture; MAPA, Ministry of Agriculture and Food Supplies; TAN, total ammoniacal nitrogen; NH₄-N, ammonium nitrogen.

3.1 Abstract

Efficient management practices are needed for no-till (NT) cropping systems fertilized with pig slurry (PS). We evaluated the effect of application mode (surface broadcasting vs. injection) with or without the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD), on the recovery of PS ammonium nitrogen (NH₄-N) in 2-yr crop succession (corn [*Zea mays* L.]/oat [*Avena strigosa* L.]/corn/wheat [*Triticum aestivum* L.]) under NT and irrigation. Each crop received PS at planting. The NH₄-N fraction of PS was enriched with ¹⁵N to discriminate the contribution of current vs. past applications to crop N uptake. Compared to surface application, injection increased corn uptake of PS NH₄-N by 22 kg N ha⁻¹ under low precipitation regime, likely because it efficiently reduced ammonia volatilization; the effect was small under high precipitation regime and in winter crops in general. To the contrary, DCD doubled the uptake of PS NH₄-N in corn (+24 kg N ha⁻¹) under high precipitation regime, likely because it reduced losses through N leaching, whereas the gain was smaller under drier conditions and in winter crops in general. Because of this complementary

¹ Artigo elaborado de acordo com as normas da Agronomy Journal (aceito em 30 de janeiro de 2016).

response to injection and DCD, the retention of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil–plant system for the whole crop succession was maximized where PS was injected in combination with DCD, being 19 to 23% greater than injection or DCD alone. The injection of DCD-treated PS is therefore recommended to maximize crop uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ and minimize environmental losses under irrigated NT conditions in southern Brazil.

Keywords: Animal slurry, injection, dicyandiamide, ^{15}N tracing, nitrogen recovery, no-till.

3.2 Introduction

Brazil is the fourth largest pig exporter in the world, and approximately 50% of its production is concentrated in the Southern region with a strong expansion in recent years to the Southeast of the country (USDA, 2015). Repeated application of PS to the same agricultural fields is a typical practice in Southern Brazil, due to the large volume of PS generated (about 300 000 m^3 daily) and its fertilizer value. The fertilizer value of PS is mainly attributed to its ammoniacal fraction, which accounts for 60 to 75% of the total N and is readily available for plant uptake (Yagüe et al., 2012). Nonetheless, the uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ by plants is affected by a number of factors such as method, timing and rate of application, soil and climatic conditions, and slurry composition (Choudhary et al., 1996; Schröder, 2005; Nyord et al., 2012; Bosch-Serra et al., 2015).

Land use for grain production in Brazil covers approximately 52 million ha (MAPA, 2015), with NT used on approximately half of this area. In Southern Brazil, NT system is reported to occupy more than 80% of total grain production area (Amado et al., 2006), and climate conditions allow to grow two consecutive crops per year. Typical crops are soybean or corn in the spring-summer period, and wheat or oats in the fall-winter time. In accordance with NT practices in Brazil, animal slurries cannot be incorporated by conventional tillage

and are usually left on the soil surface. This practice may result in ammonia (NH_3) volatilization losses that can reach up to 50% of the total $\text{NH}_4\text{-N}$ applied with PS (Rochette et al., 2001; Smith et al., 2008; Rochette et al., 2009; Nyord et al., 2012). By contrast, injection of PS in soil is compatible with NT and effective in reducing NH_3 volatilization (Nyord et al., 2012; Aita et al., 2014), although it may concurrently increase N_2O emissions (Chantigny et al., 2010; Aita et al., 2014).

The addition of nitrification inhibitors such as DCD to PS have been found to be effective in reducing manure N losses by maintaining PS N in the NH_4^+ form for longer. DCD reduces N_2O emissions by nitrification and denitrification (Aita et al., 2014; 2015) and NO_3^- loss through leaching (Vallejo et al., 2005, 2006), thereby increasing the chances of slurry-derived N to be taken up by the plants, immobilized in the microbial biomass, or fixed within clay lattices (Di and Cameron, 2005).

Some studies looked at the efficiency of injection and DCD to abate environmental N loss following PS application to agricultural fields (Vallejo et al., 2005; Nyord et al., 2012; Aita et al., 2014, 2015), but they have not investigated the effects on the distribution of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the plant-soil system. Assessing the effects of these management practices on the fate of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ over a complete crop succession would also help in elucidating the overall impact of injection and DCD on the sustainability of cropping systems where repeated applications of PS are commonly done (Schröder, 2005; Yagüe and Quílez, 2013).

The use of ^{15}N tracers contributed to a better understanding of the fate of $\text{NH}_4\text{-N}$ coming from animal slurries in the soil-plant system and enabled the contribution of the soil reserve and applied fertilizer/manure to crop N uptake to be distinguished (Sørensen and Amato, 2002; Hoekstra et al., 2010; Thivierge et al., 2015). Tracers were also helpful in comparing N flows for contrasting slurry application modes. Sørensen and Amato (2002) found that PS $\text{NH}_4\text{-N}$ recovered in barley in the first growing season was 14-15% with surface

application and 37-41% with injection. The recovery of residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ by the crops ranged from 1 to 4% in the following yr, and 1 to 2% in the following 2.5 year. In the same study, the total recovery of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-crop system increased from 49% for surface-applied PS to 87% when PS was injected.

To our knowledge, no studies have measured the effects of nitrification inhibitors, more specifically DCD, on the recovery and fate of $\text{NH}_4\text{-N}$ applied with PS in soil-plant systems under NT. Moreover, the studies using DCD have mainly focused on its usefulness after application of high rates of cattle urine in grassland (Di and Cameron, 2005; Moir et al., 2012; Welten et al., 2013), cattle slurry (Pain et al., 1994) and urea in different cropping systems (Rao and Pophan, 1999; Gioacchini et al., 2002; Abalos et al., 2014), with less attention to paid to PS (Zaman et al., 2009; Schirrmann et al., 2013), especially under tropical climate and soil types.

Previous studies have assessed the efficiency of nitrification inhibitors and injection of animal slurries in the soil to abate environmental N losses, but have not assessed directly the efficiency of these strategies on the retention of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-crop system. Developing PS management strategies under NT conditions that increase N-use efficiency is of fundamental importance to the development of a sustainable pig production in Brazil. The objective of this field experiment was to determine the effect of PS application mode (surface broadcasting *vs.* shallow injection) and nitrification inhibitor DCD, on the retention of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-crop system of an irrigated corn-cereal succession under NT.

3.3 Materials and methods

Description of the experimental site and set-up

This field experiment was conducted in Southern Brazil (State of Rio Grande do Sul), on the same plots as those described in Aita et al. (2014). Briefly, the experimental plots are

located at the Federal University of Santa Maria (29°43'37'' S, 53°43'29'' W [altitude, 107 m]) on a loamy kaolinitic, thermic, Typic Paleudult (Table 1). The experimental site is under subtropical humid climate with a mean annual temperature of 19°C and a mean annual precipitation of 1700 mm. The mean air temperature and precipitation during the experimental period are shown in Table 2.

During the five years prior to the experiment, the soil was left uncultivated and under natural vegetation, which was dominated by South African Love grass (*Eragrostis plana* Nees). This vegetation was killed with glyphosate in March 2011 followed by dolomitic limestone application (4 t ha⁻¹) and tillage with a moldboard plow to ~25 cm in April 2011. Wheat (*Triticum aestivum* L.) was planted in Jun. 2011, harvested in Nov. 2011, and crop residues (5.5 t dry matter ha⁻¹) were left on the soil surface.

The experimental phase started with corn planting in Dec. 2011 and ended with wheat harvest in Nov. 2013. The following five treatments were replicated four times in a completely randomized block design: (1) Control (no PS), (2) Surface broadcast PS (PSs), (3) PSs + DCD, (4) Injected PS (PSi), and (5) PSi + DCD. Each experimental plot was 5.25 × 6.0 m in size, and four 1.40 × 1.60 m microplots were delineated in the corners of each main plot (Fig. 1). Irrigation water was supplied when required (Table 2) using a sprinkler system.

Slurry characterization, handling and application to main plots

The PS used in the experiment was collected from a fattening pig facility where slurry is stored in an anaerobic storage pit. The PS was pumped and stored in 1000-L tanks 7-10 d before each application date. At the time of PS application, subsamples of the applied slurry were collected and analyzed (Table 3).

The PS was applied 1 to 3 d before planting to each crop of the succession. The injection of PS (PSi and PSi + DCD plots) was made in furrows (5-7 cm wide; 8-11 cm deep; 35 cm between two consecutive furrows). The opening of the furrows and injection of PS was

performed using a mechanical commercial applicator (Model DAOL-I 4000 Tandem, Mepel). Broadcast application of PS (PSs and PSs + DCD plots) was performed using watering cans (10 L) fitted to a perforated nozzle to ensure even distribution. Rates of PS were determined to provide a target total ammoniacal N (TAN) of 130 kg ha⁻¹ for corn and 120 kg ha⁻¹ for oat and wheat. The actual PS rates varied from 118 to 120 kg TAN ha⁻¹ for corn, and from 110 to 112 kg TAN ha⁻¹ for wheat and oat (Table 3). The DCD-treated PS was prepared by mixing DCD with unlabelled PS in 1000-L tanks at a target rate of 10 kg DCD ha⁻¹. All the PS + DCD mix required for fertilizing the eight plots (four PSs + DCD; four Psi + DCD) was prepared at once and then distributed to each plot.

Pig slurry labelling and application to microplots

A sub-sample of PS (40 L) was labelled by thoroughly mixing ¹⁵N-enriched ammonium sulphate (99 atom% ¹⁵N) just before application. Highly ¹⁵N-enriched ammonium sulphate was used to ensure adequate labelling while minimising the change in ammonium content and pH in PS (Chadwick et al., 2001). As a result, the ¹⁵N abundance of the PS NH₄-N ranged from 0.84 to 1.76 atom% (Table 3). The treatments with DCD for the microplots were prepared on site by mixing the inhibitor with labelled PS just prior to PS application. DCD is a crystal soluble in water and non-volatile that allows to be easily dissolved in PS before application in soil (Subbarao et al., 2006). The injection of labelled PS was simulated by manually applying the slurry with a graduated cylinder in furrows previously opened using the mechanical commercial applicator described above. The applicator was cleaned before the use in each microplot. The furrows were immediately filled with soil using hand tools. Broadcast application of labelled PS was performed using watering cans as described for the main plots. On each application date, ¹⁵N-labelled PS was applied to a different microplot within the main plot (Fig. 1). The other three microplots received unlabeled PS as the rest of

the main plot. Therefore, each microplot received PS on all application dates, but received ^{15}N -labelled PS only once during the course of the experiment.

Crop planting

Corn (hybrid Pioneer 30F53H) was sown manually at 7.5 plants m^{-2} (70-cm interrow) as the summer crop, whereas black oat (cultivar Agro Zebu) and wheat (cultivar Quartzo) were sown mechanically with a no-till multiple seeder (Model SHM 1517, Semeato) at 350 plants m^{-2} (17-cm interrow) as winter crops. Planting was carried out on 3 Dec. 2011 (Corn/2011), 12 Jun. 2012 (Oat/2012), 22 Nov. 2012 (Corn/2012), and 8 Jun. 2013 (Wheat/2013). Three rows of corn and eight rows of oats and wheat were planted lengthwise within each ^{15}N microplot (Fig. 1). For each phase of the crop succession, the same crop was sown and the same amount of PS was applied to all experimental plots.

Plant and soil sampling

Oat was harvested on 24 Sept. 2012 at the flowering stage and all the biomass was returned to the soil as a green manure (Oat/2012). The other crops were harvested at maturity on 23 Apr. 2012 (Corn/2011), 10 Apr. 2013 (Corn/2012) and 05 Nov. 2013 (Wheat/2013). The accumulation of ^{15}N (PS-derived) in the above-ground plant biomass (crop residues and grains) was assessed at harvest for each crop phase by sampling plants in the microplot that had received ^{15}N -labelled PS at planting. Entire plants were manually cut at 1 cm above the soil surface and the grains were manually separated from vegetative parts to determine N content and dry matter yield of crop residues and grains. For corn, five plants were collected manually on the central row, excluding the first 0.35 m of the row. The oat and wheat plants were collected over a 1.20 m band on two central rows, excluding the first 0.20 m of rows. The uptake of residual PS ^{15}N was also assessed in the final wheat phase by harvesting wheat in all microplots.

After harvest in the microplots, the grains and vegetative parts were separated, weighed, and a composite subsample (about 500 g for the main plots and 200 g for the microplots) was taken. The rest of the vegetative biomass was returned to the plots, taking care to return the ^{15}N -labelled biomass to the appropriate microplot. The same procedure was used with unlabelled materials harvested in the rest of the plot. The plant subsamples were dried at 65°C until constant weight to determine dry matter content. The grain yield was corrected to 13% moisture. The dried samples were ground to <100 mesh with a ball mill to determine total N and ^{15}N concentrations as described in the next section.

Soil samples (0-10 and 10-20 cm) were taken in all microplots with a stainless steel auger (3-cm diameter inner) five days after harvest of wheat in 2013 to measure the residual ^{15}N . Composite soil samples (eight cores per microplot: four on the row and four in the inter-row) were collected. A 30-cm band at the periphery of the microplots was left unsampled to avoid edge effects. Soil samples were analyzed to determine the total N concentration by dry combustion and ^{15}N abundance by mass spectrometry (see below). Soil samples were also collected in the control plots to determine the natural ^{15}N abundance of the site.

Analytical procedures and calculations

The dry matter content of PS was determined gravimetrically after oven-drying at 70°C for 48 h (Aita et al., 2014). Total N and TAN were determined in fresh PS by the Kjeldahl digestion and by distilling in the presence of MgO , respectively (APHA 2005). Total C in manure solids was determined by dry combustion (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy) after oven-drying at 70°C for 48 h, and pH was measured directly in a 60-mL aliquot with a pH-meter (Model DM 22, Digimed, São Paulo, Brazil). The ^{15}N abundance in PS $\text{NH}_4\text{-N}$ was determined by shaking a 10-g subsample with 100 mL of 2 M KCl for 1 h, centrifuging ($672 \times g$, 10 min), and filtering (Whatman #42). The ^{15}N abundance in the filtered KCl extract was determined by diffusion (Brooks et al., 1989). Briefly, the KCl extract was

transferred (enough to provide 100 µg NH₄-N) to a 250-mL borosilicate bottle. After adding MgO, the bottle was tightly closed and N in the KCl extract was diffused as NH₃ to an acidified glass fiber filter disc (Whatman #934-AH) suspended above the liquid phase. After 7 d of diffusion, the glass fibre disc was retrieved, dried at 50°C for 2 h, and enclosed in a tin capsule for analysis on a mass spectrometer (DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany).

Gravimetric soil moisture content was determined by oven drying (105°C for 24 h). Another portion of the soil sample was air dried, sieved to 2-mm, and ground in a ball mill (<100 mesh). Total N was determined by dry combustion (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy), whereas the ¹⁵N abundance was determined by mass spectrometry (DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany). The dried, finely ground plant samples were weighed into tin capsules and analyzed for total N and ¹⁵N as detailed above for air-dried soil.

The percentage of N derived from PS NH₄-N (NdPS) in plant and whole soil was calculated according to equation 1 (Hauck and Bremer, 1976):

$$NdPS (\%) = \frac{(s-a)}{(f-a)} \times 100 \quad (1)$$

Where *a* is the ¹⁵N natural abundance (atom %), *f* is the ¹⁵N abundance in PS (atom %), and *s* is the ¹⁵N abundance in the sample (atom %). The amount of N derived from PS NH₄-N in the plant was calculated by multiplying the NdPS by total plant N in PS-amended plots. Likewise, the amount of N derived from PS that remained in the soil after harvest of wheat was calculated using the soil NdPS and soil total N in PS-amended plots. The proportion of applied PS N recovered in the soil-plant system was determined by dividing the amount PS-derived N found in plant and soil by the amount of NH₄-N applied with PS. The

^{15}N unaccounted for in the soil-plant system was considered to represent environmental losses, assuming that ^{15}N in soil below the 20 cm depth was not available to plants.

Crop uptake (grain and residues) of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ was calculated for each phase of the crop succession. The recovery of applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-plant system was also calculated for the 2-yr crop succession as soil samples from all microplots were analyzed at the end of experiment (Wheat/2013 harvest). The amounts of PS-derived N found in soil of the four microplots were summed as they represented residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ that was applied to each crop in the succession. This measure included the PS $\text{NH}_4\text{-N}$ that was found in the vegetative parts of the plants which were returned to the soil at harvest; however, the amount of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ found in wheat residues had to be added as the residues had not been returned to the plots before soil sampling.

Crop uptake of residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ could be calculated for wheat as it was harvested from all microplots. However, the uptake of residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ had to be estimated for Corn/2012; as the uptake of N from previous applications were relatively low in wheat (1.2 to 4.3% of applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$), we assumed that applying the same proportions to corn was a reasonably good estimation. This assumption is supported by the close values reported for uptake of residual PS N by corn (e.g. 1 to 4%; Chantigny et al., 2004, 2014). The total amount of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ exported with the grains was calculated as the sum of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ recovered in grains of all crops. The unrecovered PS $\text{NH}_4\text{-N}$ was taken as the difference between the total amount of $\text{NH}_4\text{-N}$ applied with PS during the entire crop succession (459.7 kg ha^{-1}) and the sum of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ recovered in the soil and crop (grain and residues). Unrecovered PS $\text{NH}_4\text{-N}$ was assumed to represent potential environmental losses for the entire crop succession.

Statistical Analyses

The effects of PS application mode, use of DCD, and their interaction on the amounts of slurry $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ that were recovered in plants and soil were subjected to analysis of variance

(ANOVA) using the MIXED procedure of SAS (version 8, SAS Institute, Inc., Cary, NC), with PS application mode and DCD as fixed factors, and treatment replications as a random factor. The treatment effects were tested on plant uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ for each crop phase separately, and on the amounts of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ applied during the entire crop succession and either unrecovered, or found in grains and soil. Treatment means were compared using LSMEANS with a protected LSD test. Statistical significance was set *a priori* to the 5% confidence level.

3.4 Results and discussion

Treatment effects on crop uptake of recently-applied pig slurry $\text{NH}_4\text{-N}$

Summer crop. Compared with surface application, injection of PS increased the amount of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ taken up by corn from 30.5 to 47.9 kg ha^{-1} in Corn/2011, and from 16.7 to 25.8 kg ha^{-1} in Corn/2012 (Table 4). This effect reflected in both the grain and residue portions of the crop in Corn/2011, and in the residues portion in Corn/2012, indicating that the gain in PS N uptake with injection resulted in agronomic (greater N export with grains) and environmental (greater capture of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in crop residues) benefits. This is in agreement with Sørensen and Amato (2002) who reported that barley recovered 37-41% of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ when PS was injected, as compared to 14-15% with surface-banding. The greater recovery of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ with injection can be attributed to the reduction in N losses by ammonia volatilization (Dell et al., 2012; Nyord et al., 2012; Aita et al., 2014) and also to a greater immobilization of PS-N in soil (Sørensen and Amato, 2002). In addition, we hypothesize that the placement of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ into the corn rooting zone with injection contributed to the greater crop N uptake.

The positive effect of PS injection on total corn N uptake was less in Corn/2012 than in Corn/2011 (Table 4). The difference could be explained by different moisture regimes

between years. In Corn/2011, the plots received only 30 mm of water for the first 15 d following PS application (Table 2; 6 mm of rain plus 24 mm of irrigation), whereas the 30-yr normal for the study area is 72 mm for the same period. This likely delayed the infiltration of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil in PSs plots and exacerbated ammonia volatilization, thereby maximizing the benefit of injection in retaining PS N in the soil. By contrast, 85 mm of rainfall occurred in the first 15 d following PS application to corn in 2012, which likely favored a rapid infiltration of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the PSs plots and reduced ammonia losses (Rochette et al., 2001; Sommer and Hutchings, 2001), resulting in a smaller benefit from injection. Therefore, the relative increase in crop uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ with injection appeared to be maximized under low as compared to high moisture conditions.

The addition of DCD did not change the uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in Corn/2011, regardless of the slurry application mode, but it doubled the uptake (average of 21 kg ha^{-1} without vs. 45 with DCD) in Corn/2012, and this reflected in the grain and crop residue portions (Table 4), indicating agronomic and environmental benefits. It also amplified the effect of injection on N uptake in Corn/2011 (grain and total N), as indicated by the significant application mode \times inhibitor interaction. As the efficiency of DCD to slow down nitrification and NO_3 formation was similar between Corn/2011 and Corn/2012 (Aita et al., 2014), the contrasting corn N uptake between years could be explained by different moisture regimes. The small amount of water received for the first 30 d (47 mm) following PS application in Corn/2011 (Table 2), most likely limited NO_3 leaching, regardless of the presence or absence of DCD. As a result the availability of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in soil and its uptake by corn were similar with or without DCD. Even though controlled irrigation was provided to Corn/2011 to compensate for the very low precipitation, the effect of DCD was not improved, likely because irrigation water did not cause significant N leaching.

By contrast, high rainfall (223 mm) occurred in the first 30 d after PS application in Corn/2012 (Table 2), which likely resulted in substantial leaching of NO_3^- in soils without DCD. In agreement, the average uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ by corn without DCD (PSs, PSi) under the wetter conditions of 2012 (21 kg ha^{-1}) were much lower than under the drier conditions of 2011 (39 kg ha^{-1}). Therefore, the use of DCD with PS application appears of particular interest under wet conditions because of the higher risk of NO_3^- leaching, whereas its effect would be more limited under dry conditions and controlled irrigation because the risk of NO_3^- loss is low. Frye et al. (1989) reported that nitrification inhibitors are more likely to provide a benefit under climatic conditions that promote NO_3^- leaching.

In the same area as the present experiment, Aita et al. (2014) reported a significant (28 to 66%) reduction in N_2O emissions by adding DCD to PS. They attributed this effect to the delay in nitrification that allows for readily available C to be used by soil microbes before the soil NO_3^- concentration increased, thereby decreasing denitrification potential. Our results show that in addition to the lower N_2O emissions, the use of DCD can increase crop uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$, especially under high precipitation regime.

Winter crops. Injection of PS increased the uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ from 17.6 to 23.1 kg ha^{-1} in Oat/2012, as compared to surface-applied broadcast PS (Table 4). In wheat/2013, however, a significant interaction between PS application mode and the use of DCD indicated that PS injection had a positive effect on N uptake only in the presence of DCD.

The application of DCD did not affect the uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in Oat/2012 (Table 4). Other studies has also reported similar results when DCD was combined to surface-applied urea (Gioacchini et al., 2002), urine (Cookson and Cornforth, 2002) and PS (Schirrmann et al., 2013). The lack of response to DCD suggests that the inhibitor was less efficient in reducing N losses, likely because the generally lower temperature in winter time (Table 2) slowed the

nitrification rate even without DCD, and because of lower risk of leaching loss as precipitation was generally low as compared to the summer period.

Our results indicate that PS injection improved the retention of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-plant system when applied to oat. As oat was used as a green manure in this cropping succession, the use of injection maximized incorporation of applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$ into crop tissues, thereby minimizing the risk of post-harvest N loss (Cambardella et al., 2010). Moreover, N in crop residues may be transferred to following crops as it mineralizes in subsequent years, improving the N use efficiency (NUE) within the crop rotation (Sørensen and Amato, 2002; Chantigny et al., 2004, 2014). In wheat however, it was necessary to combine PS injection with DCD to obtain a positive increase in the uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in grains (Table 4). Overall, DCD had a limited effect on the uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ by winter crops.

Total crop N uptake (labelled plus non-labelled) ranged from 142 to 200 kg N ha^{-1} in Corn/2011, 81 to 91 kg N ha^{-1} in Oat/2012, 159 to 215 kg N ha^{-1} in Corn/2012, and 122 to 166 kg N ha^{-1} in Wheat/2013 (Fig. 2). In general, total N uptake was greater for injected than surface-applied PS, and was maximized where injection was combined with DCD (PSi + DCD), for all crops except oat. The addition of DCD improved crop N uptake only in Corn/2012 and Wheat/2013, and only when combined with injection (significant interaction with application mode). As the second half of the crop succession was wetter than the first half (Table 2), our results are in general agreement with previous discussion that DCD is more efficient to favor crop N uptake under wet than under dry moisture conditions.

In all cases, N found in crops originated dominantly (73 to 81%) from the unlabelled N sources (Fig. 2), such as the soil N reserve and the organic fraction of PS N, indicating that applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$ represented only a small portion of total crop N at harvest. This is in agreement with previous work using labelled organic and mineral N fertilizers, indicating that

the main source of N to the crops generally comes from the soil reserve (Sørensen and Amato, 2002; Chantigny et al., 2004; Nyiraneza et al., 2010).

Wheat uptake of residual pig slurry NH₄-N

Overall, the uptake of residual PS NH₄-N in wheat (residues plus grain) decreased as the time elapsed between PS application and wheat cropping increased, and tended to be proportional to the amount of residual PS NH₄-N found in the soil (Table 5). As a result, at harvest wheat biomass contained 1.5 to 4.3% of PS NH₄-N that was previously applied to Corn/2012 (350 d after PS application), 2.3 to 3.2% of PS NH₄-N applied to Oat/2012 (511 d after application), and 1.2 to 1.6% of PS NH₄-N applied to Corn/2011 (705 d after application). These values are similar to the 1 to 5% uptake of residual PS N reported for barley (Sørensen and Amato, 2002) and corn (Jayasundara et al., 2010; Chantigny et al., 2004, 2014).

In general, wheat uptake of residual PS NH₄-N was greater in PSi + DCD than in the other treatments, which were similar between each other (Table 5). The exception was for wheat uptake of PS NH₄-N applied to Corn/2012 which was greater for PSi + DCD (4.3%) and PSs + DCD (4.1%) than for PSs (1.5%) and PSi (1.8%). These results suggest that in addition to the effect of DCD on crop uptake of recently-applied PS NH₄-N (Table 4), this effect was carried over to the next crops (Table 5). This is in agreement with Walters and Malzer (1990) who reported greater corn uptake of residual ¹⁵N-labelled urea where it was incorporated in soil with the nitrification inhibitor nitrapyrin. The authors attributed this carried-over effect to the remineralization of previously immobilized ¹⁵N-urea.

Residual pig slurry NH₄-N in soil

At the end of the experiment, 40-44% of PS NH₄-N that was applied to Wheat/2013 was recovered in the top 20 cm of soil (Table 5), and were greater than proportions measured from former applications (10-16% for PS applied to Corn/2012, 21-36% for PS applied to

Oat/2012, and 5-19% for PS applied to Corn/2011). The greater recovery with PS applied to wheat is explained by the shorter period of time elapsed between PS application and soil sampling. The greater recovery measured for PS applied to Oat/2012 than Corn/2012, despite a longer period of time elapsed since application in the former, is because the whole oat biomass was returned to the soil as a green manure and there was no N exported with grain.

The application mode did not influence the recovery of residual $\text{NH}_4\text{-N}$ in soil from PS applied to Corn/2011, Corn/2012, and Wheat/2013 (Table 5). This is in line with Sørensen and Amato (2002) who recovered similar amounts of residual $\text{NH}_4\text{-N}$ in soils cropped to barley with surface-applied and injected PS. By contrast, the positive effect of injection on the recovery in soil of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ applied to Oat/2012 (Table 5) likely reflects the greater uptake of injected PS $\text{NH}_4\text{-N}$ by oat (Table 4), which was totally returned to soil as a green manure.

The use of DCD increased the amounts of residual $\text{NH}_4\text{-N}$ recovered in soils for PS applied to Corn/2011, and the same trend was found for PS applied to Corn/2012 (Table 5). Walters and Malzer (1990) reported similar results after incorporating in the soil urea with the nitrification inhibitor nitrapyrin. These results can be associated with the inhibitory effect of DCD on nitrification, which reduces NO_3^- leaching and gaseous emissions from nitrification and denitrification (Vallejo et al., 2005, 2006; Aita et al., 2014, 2015), thereby increasing the likelihood for its immobilization in the soil or its absorption by plant roots (Di and Cameron, 2005).

It is noteworthy that the effects of injection and DCD for PS applied to Corn/2011 and Corn/2012 were still detectable in soil residual N at wheat harvest, *i.e.*, 350 to 705 d after PS application (Table 5). To our knowledge, this is the first report showing that the influence of DCD on the retention of manure N in soil can be detected more than a year after application. The recovery of residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ applied to Corn/2012 was similar to the recovery of PS that was applied to Corn/2011, indicating a stabilization of residual N beyond the first year

following PS application, in agreement with previous reports (Sørensen and Amato, 2002; Sørensen, 2004; Chantigny et al., 2004, 2014).

More than 80% of residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ present in soil (0-20 cm) was found in the top 10 cm (Table 5). Moreover, in all cases, less than 1% of residual PS $\text{NH}_4\text{-N}$ was recovered in the soil mineral N pool, regardless of DCD application or of PS application mode (data not shown), suggesting that the applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$ remaining in the soil at wheat harvest had been immobilized. Previous studies have also indicated that most manure N remains in the surface soil layer (Chantigny et al., 2014; Thivierge et al., 2015), and that more than 95% of this residual manure N is present in immobile organic or clay-fixed forms (Sørensen and Amato, 2002; Chantigny et al., 2004, 2014; Hoekstra et al., 2010). In our case, we hypothesize that residual PS ^{15}N was essentially present in the soil organic N pool as our soil has kaolinite as the dominant clay mineral, with minor content of a highly polymerized hydroxy-Al 2:1, both having relatively low NH_4 fixing capacity (Kampf et al., 1995).

Global recovery of $\text{NH}_4\text{-N}$ from pig slurry applied over the whole crop succession

The total recovery of PS- ^{15}N in the plant-soil system at the end of the crop succession ranged from 64 to 75% for PS applied to Wheat/2013 (sum of crop N uptake for Wheat/2013 [Table 4] and residual soil N for Wheat/2013 [Table 5]). This is in line with values of 40 to 87% reported in previous studies where only the ammonium fraction of animal slurries was enriched with ^{15}N (Sørensen and Amato, 2002; Sørensen, 2004; Hoekstra et al., 2010). As a result, 25 to 36% of $\text{NH}_4\text{-N}$ applied with PS to wheat was not recovered, and was likely lost through gaseous N emissions and leaching of $\text{NO}_3\text{-}^{15}\text{N}$ below the 20 cm depth.

As the soil and wheat were collected from all microplots at the end of the experiment, it was possible to extend our estimation of the recovery of applied PS- ^{15}N in the soil-plant system to the entire crop succession, and to determine the global influence of PS application mode and DCD on the efficiency of the whole cropping system to retain PS $\text{NH}_4\text{-N}$. The total

amount of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ exported with grains (sum of grain-N exported with Corn/2011, Corn/2012, and Wheat/2013) ranged from 61 to 100 kg N ha^{-1} and was greater with injected than surface-applied PS, and greater with than without DCD (Table 6). Similarly to the total amount of N exported with grains, it was possible to calculate the total amount of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ applied during the crop succession that remained in the soil at wheat harvest. These values ranged from 93 to 138 kg N ha^{-1} and were greater for injected than surface-applied PS, and greater with than without DCD. Whereas a greater recovery of applied N in grains has a direct benefit from an agronomic point of view, a greater recovery of applied N in the surface soil and crop residues has environmental benefits in the short term, and likely results in a greater “legacy effect” for crop N uptake in subsequent years.

A total of 460 $\text{kg NH}_4\text{-N}$ were applied with PS over the entire crop succession. By subtracting the values presented above, the amount of applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$ that was not recovered in the plant-soil system ranged from 221 to 306 kg N ha^{-1} , and was smaller for injected than surface-applied PS, and smaller with than without DCD (Table 6). Overall, our results indicate that the injection of PS treated with DCD resulted in the greatest uptake efficiency of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ by the crops, maximized the retention of applied PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil and, thereby, minimized potential losses to the environment. These results confirm the effectiveness in combining the PS injection and nitrification inhibitor DCD for controlling of N losses to the environment after the PS application (Vallejo et al., 2005; Aita et al., 2014).

3.5 Conclusion

For recently-applied PS, the efficiency of PS injection in combination with DCD addition to improve the crop uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ and its retention in the soil on the season of application depended on the precipitation regime, and the two practices showed complementary responses: Injection was more efficient under dryer than wetter conditions,

whereas the use of DCD improved the retention of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ only under wet conditions. When considering the entire 2-yr crop succession, the retention of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-plant system was clearly maximized where PS injection was combined with DCD, most likely because of the opposed and complementary response of the two practices to the precipitation regime. Even though the economic gains/costs of injection and the use of DCD remain to be established, we conclude that combining slurry injection with the use of DCD is an appropriate practice to maximize crop uptake of PS $\text{NH}_4\text{-N}$ and minimize environmental N losses for corn-cereal crop successions under irrigated, NT conditions in Southern Brazil.

Acknowledgements

This work was supported by the CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) Foundation (Brazil). The technical assistance of several students in laboratory and field activities is gratefully acknowledged. We thank Johanne Tremblay for statistical analyses and discussions about the results.

3.6 References

- Abalos, D., S. Jeffery, A. Sanz-Cobena, G. Guardia, and A. Vallejo. 2014. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agr. Ecosyst. Environ.* 189:136-144. doi:10.1016/j.agee.2014.03.036
- Aita, C., R. Gonzatto, E.C.C. Miola, D.B. Santos, P. Rochette, D.A. Angers, M.H. Chantigny, et al. 2014. Injection of DCD-treated pig slurry reduced NH_3 volatilization without enhancing soil N_2O emissions from no-till corn in southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 43:789-800. doi:10.2134/jeq2013.07.0301
- Aita, C., J. Schirrmann, S.B. Pujol, S.J. Giacomini, P. Rochette, D.A. Angers, M.H. Chantigny, et al. 2015. Reducing nitrous oxide emissions from a maize-wheat

- sequence by decreasing soil nitrate concentration: effects of split application of pig slurry and dicyandiamide. *Europ. J. Soil. Sci.* 66:359-368. doi:10.1111/ejss.12181
- Amado, T.J.C., C. Bayer, P.C. Conceição, E. Spagnollo, B.C. Campos, and M. Veiga. 2006. Potential of carbon accumulation in zero tillage soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35: 1599-1607. doi:10.2134/jeq2005.0233
- APHA, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st Ed. American Public Health Association. Washington, DC.
- Bosch-Serra, A.D., C. Ortiz, M.R. Yagüe, and J. Boixadera. 2015. Strategies to optimize nitrogen efficiency when fertilizing with pig slurries in dry land agricultural systems. *Europ. J. Agronomy.* 67:27-36. doi:10.1016/j.eja.2015.03.003
- Brooks, P.D., J.M. Stark, B.B. McInteer, and T. Preston. 1989. Diffusion method to prepare soil extracts for automated ^{15}N analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1707-1711. doi:10.2136/sssaj1989.03615995005300060016x
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, and J.W. Singer. 2010. Soil nitrogen response to coupling cover crops with manure injection. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 87:383-393. doi:10.1007/s10705-010-9345-9
- Chadwick, D.R., J. Martinez, C. Marol, and F. Beline. 2001. Nitrogen transformations and ammonia loss following injection and surface application of pig slurry: a laboratory experiment using slurry labelled with ^{15}N -ammonium. *J. Agric. Sci.* 136:231-240. doi:10.1017/S0021859601008632
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, T. Morvan, and C. Pomar. 2004. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ^{15}N . *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:637-643. doi:10.2136/sssaj2004.6370
- Chantigny, M.H., P. Rochette, D.A. Angers, S. Bittman, K. Buckley, D. Massé, D. Bélanger, N. Eriksen-Hamel, and M.O. Gasser. 2010. Soil nitrous oxide emissions following

- band-incorporation of fertilizer nitrogen and swine manure. *J. Environ. Qual.* 39:1545-1553. doi:10.2134/jeq2009.0482
- Chantigny, M.H., D. Angers, P. Rochette, C. Pomar, and D. Pelster. 2014. Evidencing overwinter loss of residual organic and clay-fixed nitrogen from spring-applied, ¹⁵N-Labelled pig slurry. *Can. J. Soil Sci.* 94:1-8. doi:10.4141/cjss2013-072
- Choudhary, M., L.D. Bailey, and C.A. Grant. 1996. Review of the use of swine manure in crop production: Effects on yield and composition and on soil and water quality. *Waste Manage. Res.* 14:581-595. doi:10.1177/0734242X9601400606
- Cookson, W.R. and I.S. Cornforth. 2002. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield. *Soil Biol. Biochem.* 34:1461-1465. doi:10.1016/S0038-0717(02)00090-1
- Dell, C.J., P.J.A. Kleinman, J.P. Schmidt, and D.B. Beegle. 2012. Low disturbance manure incorporation effects on ammonia and nitrate loss. *J. Environ. Qual.* 41:928-937. doi:10.2134/jeq2011.0327
- Di, H.J. and K.C. Cameron. 2005. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 109:202-212. doi:10.1016/j.agee.2005.03.006
- Frye, W.W., D.A. Graetz, S.J. Locascio, D.W. Reeves, and J.T. Touchton. 1989. Dicyandiamide as a nitrification inhibitor in crop production in southeastern USA. *Commun. Soil Sci. Plan. Analy.* 20:1969-1999. doi:10.1080/00103628909368197
- Gioacchini, P., A. Nastri, C. Marzadori, C. Giovannini, L.V. Antisari, and C. Gessa. 2002. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. *Biol. Fertil. Soils.* 36:129-135. doi: 10.1007/s00374-002-0521-1
- Hauck, R.D. and J.M. Bremner. 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Adv. Agron.* 28:219-266. doi:10.1016/S0065-2113(08)60556-8

- Hoekstra, N.J., S.T.J. Lalor, K.G. Richards, N. O’Hea, G.J. Lanigan, J. Dyckmans, R.P.O. Schulte, and O. Schmidt. 2010. Slurry $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ recovery in herbage and soil: Effects of application method and timing. *Plant Soil*. 330:357-368. doi: 10.1007/s11104-009-0210-z
- Jayasundara, S., C. Wagner-Riddle, G. Parkin, J. Lauzon, and M.Z. Fan. 2010. Transformations and losses of swine manure ^{15}N as affected by application timing at two contrasting sites. *Can. J. Soil. Sci.* 90:55-73. doi:10.4141/CJSS08085
- Kampf, N., A.C. Azevedo, and M.I. Costa JR. 1995. Estrutura básica de Argilomineral 2:1 com Hidroxi-Al entrecamadas em Latossolo Bruno no Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 19:185-190. doi:10.1590/S0100-06832010000100004.
- MAPA, 2015. Estatísticas e Dados Básicos de Economia Agrícola. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, <http://www.agricultura.gov.br> (Accessed 01.07.15).
- Moir, J.L., B.J. Malcolm, K.C. Cameron, and H.J. DI. 2012. The effect of dicyandiamide on pasture nitrate concentration, yield and N offtake under high N loading in winter and spring. *Grass Forage Sci.* 67:391-402. doi:10.1111/j.1365-2494.2012.00857.x
- Nyiraneza, J., M.H. Chantigny, A. N’Dayegamiye, and M.R. Laverdière. 2010. Long-Term Manure Application and Forages Reduce Nitrogen Fertilizer Requirements of Silage Corn–Cereal Cropping Systems. *Agron. J.* 102:1244-1251. doi:10.2134/agronj2009.0480
- Nyord, T., M.N. Hansen, and T.S. Birkmose. 2012. Ammonia volatilization and crop yield following land application of solid-liquid separated, anaerobically digested, and soil injection animal slurry to winter wheat. *Agric. Ecosyst. Environ.* 160:75-81. doi:10.1016/j.agee.2012.01.002

- Pain, B.F., T.H. Misselbrook, and Y.R. Rees. 1994. Effects of nitrification inhibitor and acid addition to cattle slurry on nitrogen losses and herbage yields. *Grass Forage Sci.* 49:209-215.
- Rao, S.C and T.W. Popham. 1999. Urea placement and nitrification inhibitor effects on growth and nitrogen accumulation by no-till winter wheat. *Crop Science.* 39:1115-1119. doi:10.2135/cropsci1999.0011183X003900040027x
- Rochette, P., C.H. Chantigny, D.A. Angers, N. Bertrand, and D. Cote. 2001. Ammonia volatilization and soil nitrogen dynamics following fall application of pig slurry on canola crop residues. *Can. J. Soil Sci.* 81:515-523. doi:10.4141/S00-044
- Rochette, P., D.A. Angers, M.H. Chantigny, D. MacDonald, M. Gasser, and N. Bertrand. 2009. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 84:71-80. doi:10.1007/s10705-008-9227-6
- Schirmann, J., C. Aita, S.J. Giacomini, S.B. Pujol, D.A. Giacomini, R. Gonzatto, and J. Olivo. 2013. Inibidor de nitrificação e aplicação parcelada de dejetos de suínos nas culturas do milho e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, v.37, p.271-280. doi:10.1590/S0100-06832013000100028
- Schröder, J. J. 2005. Revisiting the agronomic benefits of manure: a correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. *Bioresource Technol.* 96:253-261. doi:10.1016/j.biortech.2004.05.015
- Smith, E., R. Gordon, C. Bourque, and A. Campbell. 2008. Management strategies to simultaneously reduce ammonia, nitrous oxide and odour emissions from surface-applied swine manure. *Can. J. Soil Sci.* 88:571–584. doi:10.4141/CJSS07089

- Sommer, S.G. and N.J. Hutchings. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction – invited paper. *Eur. J. Agron.* 15:1-15. doi:10.1016/S1161-0301(01)00112-5
- Sørensen, P. and M. Amato. 2002. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil. *Eur. J. Agron.* 16:81-95. doi:10.1016/S1161-0301(01)00119-8
- Sørensen, P. 2004. Immobilisation, remineralisation and residual effects in subsequent crops of dairy cattle slurry nitrogen compared to mineral fertiliser nitrogen. *Plant Soil.* 267:285-296. doi:10.1007/s11104-005-0121-6
- Subbarao, G. V., O. Ito, K. L. Sahrawat, W. L. Berry, K. Nakahara, T. Ishikawa, T. Watanabe, K. Suenaga, M. Rondon, and I. M. Rao. 2006. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems - Challenges and opportunities. *Crit. Rev. Plant. Sci.* 25:303-335. doi: 10.1080/07352680600794232
- Thivierge, M., M.H. Chantigny, P. Seguin, and A. Vanasse. 2015. Sweet pearl millet and sweet sorghum have high nitrogen uptake efficiency under cool and wet climate. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 102:195-208. doi:10.1007/s10705-015-9689-2
- USDA, 2015. *Livestock and Poultry: World Markets and Trade*. United States Department of Agriculture, <http://www.fas.usda.gov/> (Accessed 19.06.15).
- Vallejo, A., G.L. Torres, J.A. Díez, A. Arce, and S.L. Fernández. 2005. Comparison of N losses (NO_3 , N_2O , NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate. *Plant Soil.* 272:313-325. doi:10.1007/s11104-004-5754-3
- Vallejo, A., U.M. Skiba, L.T. Torres, A. Arce, S.L. Fernández, and L.S. Martín. 2006. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts. *Soil Biol. Biochem.* 38:2782-2793. doi:10.1016/j.soilbio.2006.04.040

- Walters, D.T. and G.L. Malzer. 1990. Nitrogen management and nitrification inhibitor effects on nitrogen-15 urea: I. Yield and fertilizer use efficiency. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:115-112. doi:10.2136/sssaj1990.03615995005400010018x
- Welten, B.G., S.F. Ledgard, L.A. Schipper, and A.A. Judge. 2013. Effect of amending cattle urine with dicyandiamide on soil nitrogen dynamics and leaching of urinary-nitrogen. *Agr. Ecosyst. Environ.* 167:12-22. doi:10.1016/j.agee.2013.01.011
- Yagüe, M.R., A.D. Bosch-Serra, and J. Boixadera. 2012. Measurement and estimation of the fertiliser value of pig slurry by physicochemical models: Usefulness and constraints. *Biosyst. Eng.* 3:206-216. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.11.013
- Yagüe, M.R., and D. Quílez. 2013. Residual effects of fertilization with pig slurry: Double Cropping and soil. *Agron. J.* 14:415-421. doi:10.2134/agronj2012.0191
- Zaman, M., S. Sagar, J.D. Blennerhassett, and J. Singh. 2009. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biol. Biochem.* 41:1270-1280. doi:10.1016/j.soilbio.2009.03.011

Figure captions

- Fig. 1. Scheme of an experimental plot with the location and dimension of the microplots after the complete four-crop rotation and four applications of pig slurry. Where: Corn/2011, corn planted in summer 2011; Oat/2012, oat planted in winter 2012; Corn/2012, corn planted in summer 2012; Wheat/2013, wheat planted in winter 2013.
- Fig. 2. Crop uptake (grain + crop residues) of labelled (pig slurry-derived $\text{NH}_4^+\text{-N}$) and unlabelled (soil-derived N and PS organic N) in Corn/2011 (a), Oat/2012 (b), Corn/2012 (c) and Wheat/2013 (d) after surface broadcast of PS without (PSs) or with dicyandiamide (PSs + DCD), or injection without (PSi) or with dicyandiamide (PSi + DCD). Vertical bars indicate standard errors (n=4). Oat was harvested at a vegetative stage (flowering) and returned to soil as a green manure.

Table 1. Selected characteristics of the soil at the experimental site.

Characteristics	Soil depth (cm)	
	0-10	10-20
Clay content, g kg ⁻¹	192	209
Sand content, g kg ⁻¹	443	414
Bulk density, g cm ⁻³	1.38	1.49
pH _{water} (1:1, soil:water ratio)	5.9	5.0
Organic carbon content, g kg ⁻¹	27.0	23.0
Total N content, g kg ⁻¹	1.6	1.3
Cation exchange capacity, cmol _c dm ⁻³	12.9	15.3
Mehlich-I P, cmol _c dm ⁻³	6.7	7.2
Mehlich-I K, mg dm ⁻³	39.0	27.0
KCl-extractable Ca, cmol _c dm ⁻³	9.8	5.5
KCl-extractable Mg, cmol _c dm ⁻³	3.1	1.7

Table 2. Mean air temperature (maximum and minimum), precipitation, and irrigation for various periods during the experiment (2011 to 2013).

Crop/year of planting	Period Days [‡]	Accumulated precipitation mm	Mean temperature	
			Maximum	Minimum
			———— °C ————	
Corn/2011	0-15	5.6 (24) [†]	29.9	16.5
	16-30	11.4 (6)	30.8	18.1
	31-60	183.2 (42)	32.6	19.4
	61 to harvest	458.0 (40)	31.6	18.5
Oat/2012	0-15	35.0	20.3	11.3
	16-30	3.0	22.1	12.7
	31-60	35.0	20.2	8.9
	61 to harvest	243.0	24.6	14.5
Corn/2012	0-15	85.0	30.9	18.8
	16-30	138.2	31.8	19.8
	31-60	288.4	29.9	19.1
	61 to harvest	399.2 (115)	26.3	15.1
Wheat/2013	0-15	55.6	18.3	10.6
	16-30	76.2	20.0	9.7
	31-60	76.2	19.8	8.5
	61 to harvest	347.6	23.1	12.0

[†] Values in parentheses represent the accumulated irrigation for the period.

[‡] Days after PS application.

Table 3. Selected characteristics[†] and application rates for pig slurry applied to each phase of the 2-yr crop succession.

Characteristics	Corn/2011	Oat/2012	Corn/2012	Wheat/2013
Dry matter, g L ⁻¹	27.0	37.0	23.0	41.1
Total C, g L ⁻¹	7.02	12.80	7.33	10.79
Total N, g L ⁻¹	2.99	3.99	3.28	3.76
TAN‡, g L ⁻¹	2.35	2.81	2.42	2.75
pH	8.20	6.10	7.20	6.90
¹⁵ N abundance, atom%	1.76	1.75	1.12	0.84
<i>Application rates</i>				
Volume, m ³ ha ⁻¹	50.0	40.0	49.5	40.0
Total N, kg ha ⁻¹	149.5	159.0	162.3	150.2
NH ₄ -N, kg ha ⁻¹	117.9	112.0	119.8	109.9
Excess ¹⁵ N added, mg m ⁻²	206.8	196.7	134.1	92.4

[†] Values are the average of measurements on four subsamples for each batch of slurry; a different batch of slurry was used for each crop phase.

‡ Total ammoniacal nitrogen (NH₃-N + NH₄-N).

Table 4. Uptake of recently-applied pig slurry $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in aboveground plant parts (grain and crop residues) at harvest for Corn/2011, Oat/2012, Corn/2012 and Wheat/2013 as a function of PS application mode and use of the nitrification inhibitor dicyandiamide.

Crop/Year of planting Treatments [†]	Grain	Crop residues	Total
Corn/2011			
PSs	21.22	9.27	30.49
PSs + DCD	15.62	8.48	24.10
PSi	32.24	15.64	47.88
PSi + DCD	33.74	17.33	51.07
ANOVA		<i>P</i> values	
Application mode (A)	<0.001	<0.001	<0.001
Inhibitor (B)	0.153	0.663	0.445
A X B	0.022	0.252	0.040
Oat/2012			
PSs	na [‡]	17.60	17.60
PSs + DCD	na	15.13	15.13
PSi	na	23.13	23.13
PSi + DCD	na	25.17	25.17
ANOVA		<i>P</i> values	
Application mode (A)	na	0.001	0.001
Inhibitor (B)	na	0.897	0.897
A X B	na	0.203	0.203
Corn/2012			
PSs	13.18	3.50	16.68
PSs + DCD	31.08	11.86	42.94
PSi	19.35	6.42	25.77
PSi + DCD	28.62	17.56	46.18
ANOVA		<i>P</i> values	
Application mode (A)	0.365	0.003	0.042
Inhibitor (B)	<0.001	<0.001	<0.001
A X B	0.057	0.233	0.276
Wheat/2013			
PSs	19.49	6.74	26.23
PSs + DCD	17.94	7.42	25.36
PSi	18.34	9.57	27.91
PSi + DCD	26.66	12.13	38.79
ANOVA		<i>P</i> values	
Application mode (A)	0.026	0.003	0.008
Inhibitor (B)	0.040	0.126	0.047
A X B	0.008	0.357	0.025

[†] DCD, dicyandiamide; PSi, injected pig slurry; PSs, surface-broadcast pig slurry.

[‡] Not applicable as oat was harvested at a vegetative stage (flowering) and returned to soil as a green manure.

Table 5. Proportions of residual pig slurry $\text{NH}_4^+\text{-N}$ recovered in the plant-soil system at the end of experiment (harvest of wheat).

Crop/Year of planting Treatments [†]	Plant [‡]	Soil		Total
		0-10 cm	10-20 cm	
————— % of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ input —————				
Corn/2011				
PSs	1.16	4.72	0.72	6.60
PSs + DCD	1.32	14.99	2.48	18.79
PSi	1.22	5.75	0.84	7.81
PSi + DCD	1.60	15.53	3.43	20.56
ANOVA		<i>P</i> values		
Application mode (A)	0.041	0.291	0.485	0.001
Inhibitor (B)	0.007	<0.001	0.023	<0.001
A X B	0.167	0.739	0.583	0.345
Oat/2012				
PSs	2.26	18.51	2.29	23.06
PSs + DCD	2.33	18.64	2.26	23.23
PSi	2.41	29.75	2.74	34.91
PSi + DCD	3.20	32.61	3.38	39.19
ANOVA		<i>P</i> values		
Application mode (A)	0.033	0.001	0.064	0.001
Inhibitor (B)	0.060	0.627	0.432	0.508
A X B	0.105	0.660	0.394	0.540
Corn/2012				
PSs	1.51	9.58	1.10	12.19
PSs + DCD	4.11	11.84	1.68	17.64
PSi	1.77	10.38	1.33	13.48
PSi + DCD	4.31	12.91	3.34	20.56
ANOVA		<i>P</i> values		
Application mode (A)	0.240	0.539	0.344	0.217
Inhibitor (B)	<0.001	0.137	0.205	0.005
A X B	0.873	0.929	0.466	0.598
Wheat/2013				
PSs	na [§]	35.46	4.22	39.68
PSs + DCD	na	36.40	4.38	40.78
PSi	na	37.30	6.54	43.84
PSi + DCD	na	34.65	5.41	40.06
ANOVA		<i>P</i> values		
Application mode (A)	na	0.990	0.006	0.548
Inhibitor (B)	na	0.789	0.267	0.638
A X B	na	0.578	0.155	0.397

[†] DCD, dicyandiamide; PSi, injected pig slurry; PSs, surface-broadcast pig slurry.

[‡] N recovered in wheat biomass (grain + crop residues) from PS that was applied to the previous crops.

[§] Not applicable as this relates to the most recent PS application, which is presented as the Total N uptake values presented in Table 4 in the “Wheat/2013” section.

Table 6. Global effects of pig slurry (PS) application mode and use of DCD on the recovery of PS $\text{NH}_4^+\text{-N}$ applied to the whole crop succession[†].

Treatments [‡]	Exported by grain	Soil + crop residues	Unaccounted for
	kg $\text{NH}_4^+\text{-N ha}^{-1}$		
PSs	61 (13) [§]	94 (20)	306 (66)
PSS +DCD	75 (16)	112 (24)	272 (60)
PSi	78 (17)	116 (25)	266 (58)
PSi+DCD	100 (22)	138 (30)	221 (48)
ANOVA		<i>P</i> values	
Application mode (A)	<0.001	<0.001	<0.001
Inhibitor (B)	<0.001	0.002	<0.001
A X B	0.187	0.794	0.451

[†] Total amount of $\text{NH}_4\text{-N}$ added with PS during the experiment = 459.7 kg ha^{-1} .

[‡] DCD, dicyandiamide; PSi, injected pig slurry; PSs, surface-broadcast pig slurry.

[§] Numbers in parentheses are % of $\text{NH}_4\text{-N}$ applied with PS.

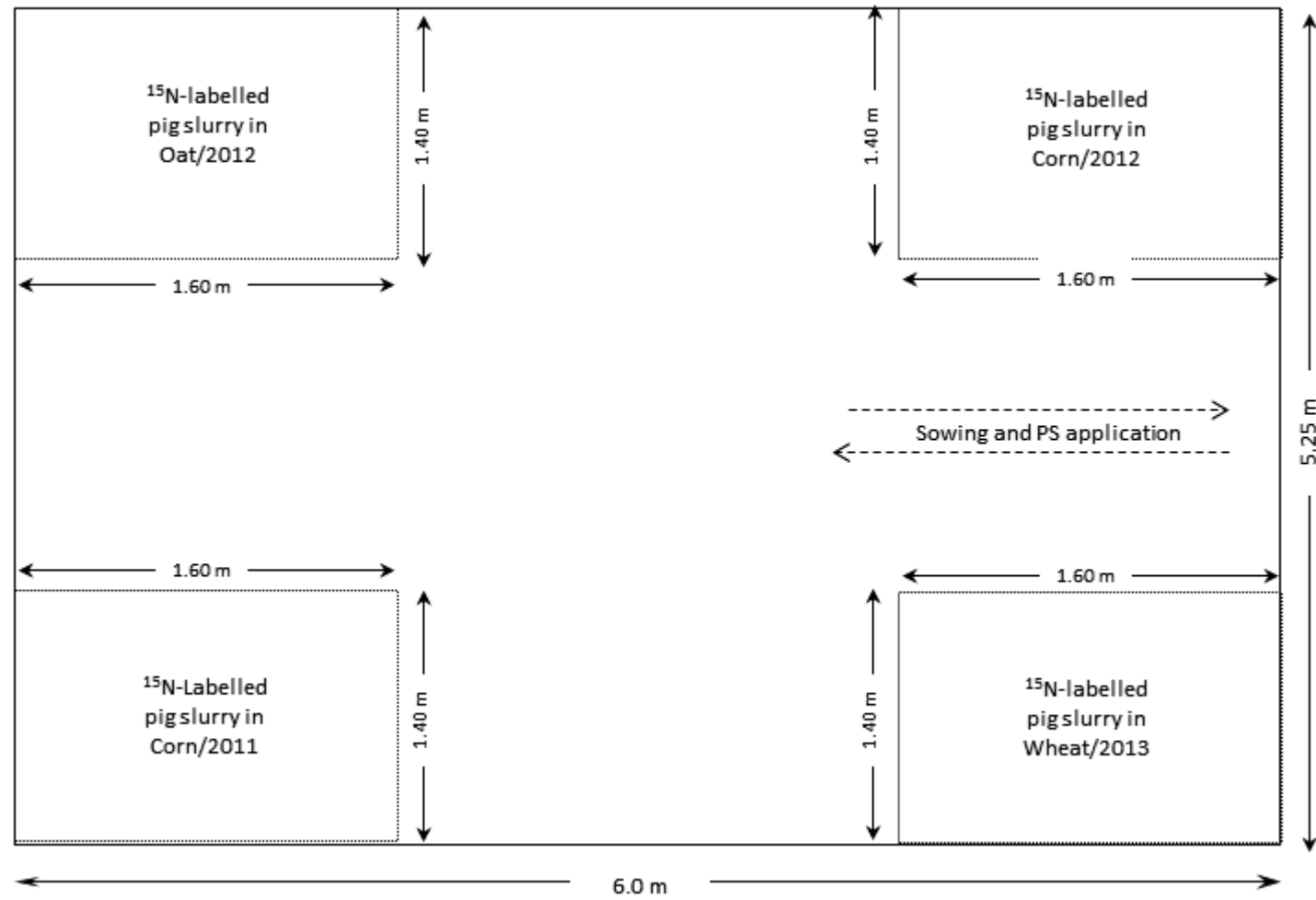


Figure 1.

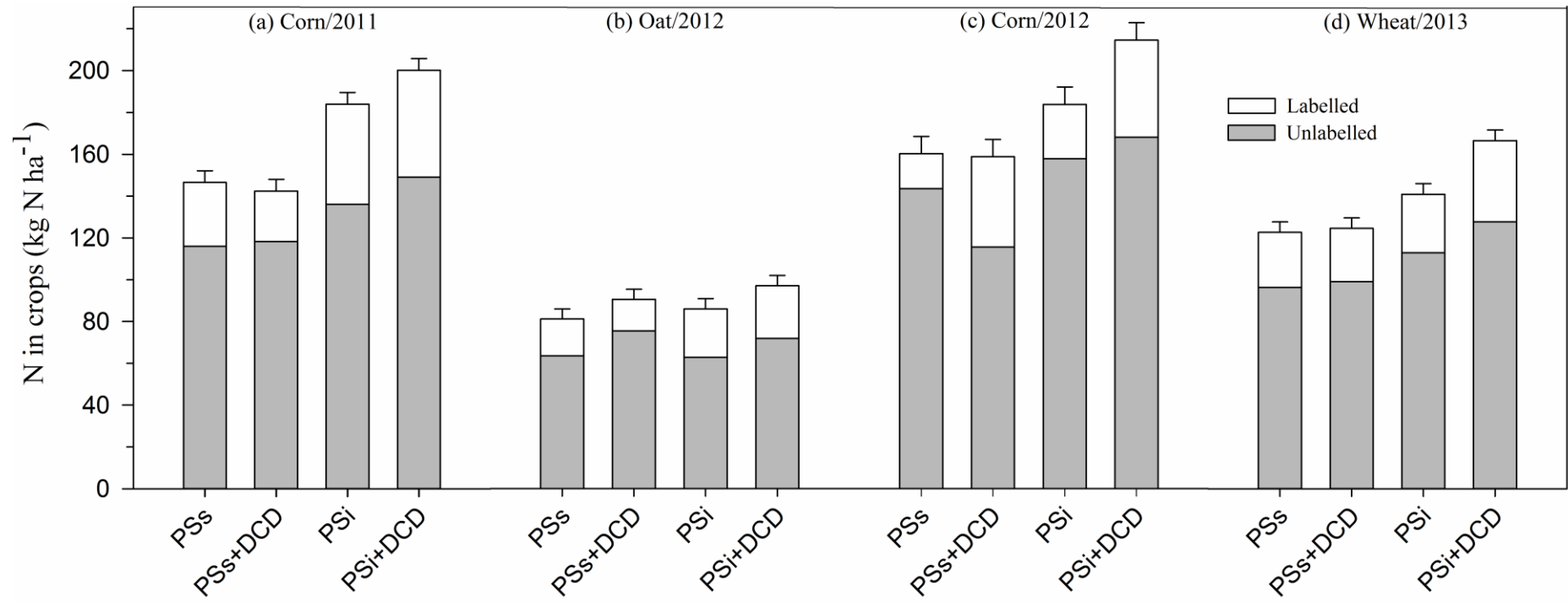


Figure 2.

4 ARTIGO II

COMO A INJEÇÃO DE DEJETOS DE SUÍNOS NO SOLO E A DICIANODIAMIDA AFETAM A EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO E A PRODUTIVIDADE DE GRAMÍNEAS EM PLANTIO DIRETO²

4.1 RESUMO

O efeito do modo de aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS) no solo em sistema de plantio direto (SPD), associado ou não à adição do inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD) aos DLS, sobre a produtividade e eficiência de uso do N (EUN) pelas culturas ainda é pouco documentado. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do modo de aplicação dos DLS no solo (injeção subsuperficial *vs* aplicação superficial) em SPD e da adição de DCD aos DLS sobre a EUN e a produtividade de milho, aveia e trigo. O experimento foi conduzido em condições de campo, na Universidade Federal de Santa Maria com aplicação de DLS em superfície ou injetada no solo, com e sem a aplicação de DCD. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso e com quatro repetições dos seguintes tratamentos: T1- Sem aplicação de fertilizante ou DCD (Testemunha); T2- Fertilizante mineral em superfície (NPK); T3- DLS em superfície (DLSs); T4- DLS em superfície com DCD (DLSs + DCD); T5- DLS injetado no solo (DLSi) e T6- DLS injetado + DCD (DLSi + DCD). A resposta das culturas à adubação orgânica com DLS ou à adubação mineral com NPK foi similar, confirmando o potencial fertilizante dos DLS. Comparada à aplicação superficial a injeção dos DLS no solo aumentou significativamente todos os atributos avaliados no milho, aveia e no trigo. A injeção aumentou a produtividade total (palha + grãos) em 1,5 Mg ha⁻¹ no milho e em 0,3 Mg ha⁻¹ no trigo, enquanto o incremento na eficiência agrônômica do N variou de 31 a 35% em ambas culturas. De modo geral, a DCD não afetou o desempenho das culturas. No entanto, no trigo em 2013, as baixas temperaturas aumentaram a eficiência da DCD, refletida em aumentos na produtividade (+15%) e na eficiência agrônômica do N (+30%). Esses resultados indicam que a eficiência de uso do N e a produtividade de gramíneas cultivadas em SPD são maximizadas pela injeção de DLS no solo, enquanto o efeito da DCD é condicionado pelas condições climáticas após sua aplicação no solo, sendo mais eficiente no inverno.

Palavras-chave: dejetos animais, modo de aplicação, inibidor de nitrificação, eficiência agrônômica.

² Artigo elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo.

HOW PIG SLURRY INJECTION INTO THE SOIL AND DICYANDIAMIDE AFFECT NITROGEN USE EFFICIENCY AND PRODUCTIVITY OF GRASSES IN NO-TILL

ABSTRACT

The effect of the application method of pig slurry (PS) into the soil in no-till system (NT), with or without the addition of nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) to PS, on productivity and nitrogen use efficiency (NUE) by crops is still poorly documented. The aim of this work was to evaluate the effect of the PS application method in the soil (shallow injection vs. surface broadcasting) in NT and the addition of DCD to PS on the NUE and productivity of corn, oats and wheat. The experiment was conducted under field conditions, applying PS in surface or injected (8-11 cm) into the soil, with and without the application of DCD (10 kg ha⁻¹). The experimental design was in randomized blocks with four repetitions of the following treatments: T1- No application of fertilizer or DCD (control); T2- mineral fertilizer in surface (NPK); T3- PS surface (PSs); T4- PS surface with DCD (PSs + DCD); T5- PS injected into the soil (PSi) and T6- PS injected + DCD (PSi + DCD). The crop response to organic fertilization with PS or mineral fertilizer with NPK was similar, confirming the fertilizer potential of PS. Compared to surface application injection of PS into the soil, all the attributes evaluated in the corn and wheat increased significantly. The injection increased the total productivity (straw + grain) in 1.5 t ha⁻¹ in the corn and 0.3 t ha⁻¹ in wheat, while the increase in the nitrogen agronomic efficiency ranged from 31 to 35% in both cultures. In general, the DCD did not affect crop performance. However, in the wheat of 2013, the low temperatures increased DCD efficiency, reflecting in increases in productivity (+15%) and the nitrogen agronomic efficiency (+30%). These results indicate that NUE and productivity of grasses in NT are maximized by PS injection into the soil, wherein the DCD effect is conditioned by weather conditions after its application in the soil, which is more efficient in winter.

Keywords: animal manures, application method, nitrification inhibitor, nitrogen agronomic efficiency.

4.2 INTRODUÇÃO

A aplicação dos dejetos líquidos de suínos (DLS) em sistema de plantio direto (SPD), em pré-semeadura de gramíneas como o milho (*Zea mays* L.), a aveia (*Avena strigosa* Schreb.) e o trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma prática comum no Sul do Brasil. Como a incorporação dos DLS ao solo é uma prática incompatível com o SPD, os mesmos devem ser aplicados sobre os resíduos culturais, o que pode provocar sérios prejuízos econômicos e ambientais. Dependendo das condições de solo e de clima após a aplicação dos DLS pode ocorrer a contaminação da água com nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), fósforo (P), patógenos e matéria orgânica (Giroto et al., 2013; De Conti et al., 2015), a emissão de maus odores (Parker et al., 2013), além de perdas de N por volatilização de amônia (NH_3) (Chantigny et al., 2004; Rochette et al., 2009b). Tais perdas diminuem a eficiência de uso do N (EUN) dos DLS pelas plantas, reduzindo o potencial fertilizante dos mesmos (Rochette et al., 2009a).

A injeção subsuperficial dos DLS no solo em SPD é uma estratégia de manejo que pode melhorar a EUN pelas plantas, já que essa prática reduz as perdas de N por volatilização de NH_3 e escoamento superficial (Maguire et al., 2011; Dell et al., 2012; Aita et al., 2014). Nos estudos de Dell et al. (2012) e Aita et al. (2014) a injeção dos DLS no solo reduziu a emissão de NH_3 para a atmosfera em mais de 90%, em relação à aplicação superficial. Apesar desses benefícios, a injeção dos DLS pode aumentar a produção e emissão de óxido nitroso (N_2O). Uma das estratégias que vem sendo empregada com resultados positivos para reduzir as emissões de N_2O quando os DLS são injetados no solo consiste da adição do inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD) aos DLS antes da sua injeção (Vallejo et al., 2005; Aita et al., 2014). Nesses trabalhos, o uso da DCD reduziu a emissão de N_2O de 46 a 66% em relação à injeção dos DLS sem DCD.

A maior parte dos estudos comparando a injeção com a aplicação superficial dos DLS em culturas anuais como o milho (Velthof e Mosquera, 2011; Dell et al., 2012; Aita et al., 2014), cereais de inverno (Perala et al., 2006; Nyord et al., 2008, 2012) e pastagem (Wulf et al., 2002; Lambert e Bork, 2003) tem focado apenas nas perdas de N por volatilização de NH_3 e, em menor intensidade, na resposta agrônômica das culturas. Nesse sentido, Russelle et al. (2008) após dois anos de estudo, mostraram maior acúmulo de N e produtividade de milho, com a injeção comparado com o DLS aplicados na superfície do solo. Sutton et al. (1982) em milho e Mooleki et al. (2002) em cereais de inverno (trigo e cevada) e canola também reportaram melhor resposta das plantas quando os DLS foram injetados no solo. Para esses

autores esse resultado pode ser atribuído a maior disponibilidade de N no solo, já que o N amoniacal dos DLS fica protegido no interior dos sulcos da ação do calor e do vento, responsáveis pela volatilização de NH_3 . Além disso, a injeção melhora a localização do N dos dejetos deixando-o mais próximo da zona de absorção desse nutriente pelas raízes.

A adição do inibidor DCD a dejetos de animais tem sido uma prática realizada principalmente em sistemas pastoris onde quantidades elevadas de N-urina ($350 - 1000 \text{ kg de N ha}^{-1}$) são aplicadas ao solo (Zaman et al., 2009; Moir et al., 2012; O'Connor et al., 2012; Welten et al., 2013). Os resultados são contraditórios, mostrando, incrementos no rendimento de biomassa e no acúmulo de N de pastagens (Zaman et al., 2009; Moir et al., 2012), mas também ausência de resposta à adição de DCD (Cookson e Cornfort, 2002; O'Connor et al., 2012). Quando ocorre incremento no rendimento de biomassa, ele é atribuído ao efeito inibitório da DCD sobre a nitrificação, reduzindo as perdas de N por desnitrificação e lixiviação de NO_3^- (Zaman et al., 2009; Moir et al., 2012). Por outro lado, a ausência de efeito da DCD pode ocorrer quando as quantidades de NO_3^- e NH_4^+ aplicadas são suficientemente elevadas para garantir o desenvolvimento das plantas, mesmo quando as perdas de N para o ambiente são elevadas (Cookson e Cornforth, 2002).

Ao contrário dos estudos com urina de bovinos em pastagem, a adição de DCD a dejetos, para melhorar a eficiência do uso de N e o rendimento de culturas produtoras de grãos ainda é uma prática muito pouco estudada, sobretudo em condições de SPD. Em uma das poucas situações em que a DCD foi adicionada aos DLS antes da sua aplicação ao solo em SPD e em condições subtropicais do Sul do Brasil, o inibidor não afetou o rendimento de grãos e o acúmulo de N pelas culturas de trigo e milho (Schirmann et al., 2013).

Entender como a injeção e a aplicação superficial dos DLS em SPD, associadas ou não ao uso do inibidor de nitrificação DCD, afetam a EUN pelas culturas é fundamental para estabelecer recomendações de aplicação de DLS nas condições subtropicais do Sul do Brasil, pois a injeção de DLS é uma prática que atualmente vem sendo introduzida como uma alternativa compatível com o SPD nessa região. Nossa hipótese é que a produtividade e a EUN das culturas fertilizadas com DLS em SPD podem ser melhorados com a adição de DCD aos DLS, sobretudo quando estes são injetados no solo. Assim, o objetivo desse trabalho foi o de avaliar o modo de aplicação dos DLS ao solo em SPD (injeção vs superficial), combinado ou não ao uso do inibidor de nitrificação DCD, sobre a eficiência de uso do N dos DLS e a produtividade de aveia e trigo no inverno e milho no verão.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

Local, clima e solo

O experimento foi conduzido no período de dezembro de 2011 a dezembro de 2015, na Universidade Federal de Santa Maria (29° 43' S, 53° 43' O, 105 m de altitude), Rio Grande do Sul, Brasil. O clima do local é o subtropical úmido do tipo Cfa2, segundo Köppen (Moreno, 1961). As precipitações e as irrigações mensais acumuladas durante o período experimental, as precipitações médias dos últimos 30 anos (1981 a 2010) e a temperatura média do ar para o período são apresentadas na figura 1. O solo do local é um Argissolo Vermelho Alumínico úmbrico (Santos, 2006) com 192 g kg⁻¹ de argila e 443 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-10 cm. As principais características químicas do solo no início do experimento, nessa mesma camada, foram: pH (água) 5,9; Ca extraível-KCl= 9,8 cmol_c dm⁻³, Mg= 3,1 cmol_c dm⁻³ e Al= 0,0 cmol_c dm⁻³; saturação de bases= 80,4%; capacidade de troca de cátions= 12,9 cmol_c dm⁻³; P (Mehlich-I)= 6,7 mg dm⁻³ e K= 39,0 mg dm⁻³. Os teores de C Total e N total (combustão seca) foram 20,5 e 1,6 g kg⁻¹, respectivamente. Antes da instalação do experimento, a área estava em pousio, cuja vegetação espontânea era constituída predominantemente por capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) até maio de 2010, quando recebeu calagem com 4 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico, que foi incorporado ao solo por aração e gradagem. Após a calagem iniciou-se na área a seguinte sucessão de culturas em SPD: aveia preta (maio a outubro de 2010), milho (novembro de 2010 a abril de 2011) e trigo (junho a novembro de 2011). O experimento iniciou com a aplicação dos tratamentos no milho em 01 de dezembro de 2011 e a partir dessa data se estabeleceu uma sucessão com gramíneas de verão (milho) e de inverno (aveia ou trigo) até dezembro de 2015. As principais operações realizadas no período experimental são apresentadas no quadro 1.

Tratamentos e delineamento experimental

Os seis tratamentos, aplicados em parcelas de 31,5 m² (5,25 x 6,0 m) no delineamento experimental de blocos ao acaso e com quatro repetições, foram os seguintes: T1- Sem aplicação de fertilizante ou DCD (Testemunha); T2- NPK mineral em superfície (NPK); T3- DLS em superfície (DLSs); T4- DLS em superfície com DCD (DLSs + DCD); T5- DLS injetado no solo (DLSi) e T6- DLS injetado + DCD (DLSi + DCD). A cada cultura, os tratamentos foram reaplicados sempre nas mesmas parcelas, 1 a 4 dias antes da semeadura.

Dejetos líquidos de suínos, NPK e dicianodiamida

Os dejetos líquidos de suínos, constituídos, principalmente, pela mistura de urina, fezes e água, e provenientes de animais em fase de terminação (30-100 kg), foram coletados em esterqueira anaeróbica e estocados em caixas d'água com capacidade de 1000 L durante 7 a 10 dias até a aplicação. A matéria seca dos DLS foi determinada após secagem dos mesmos a 70 °C por 48 h até massa constante (Aita et al., 2014). O N total e o N amoniacal total (NAT = NH₃ + NH₄⁺) foram analisados conforme Tedesco et al. (1995) nos dejetos sem secagem prévia. O C total foi determinado nos dejetos secos e moídos por combustão seca (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy) e o pH foi medido diretamente em uma alíquota de 60 mL de dejetos com pH-metro (Modelo DM 22, Digimed, São Paulo, Brasil). As principais características dos DLS e as quantidades adicionadas ao solo de matéria seca, C e N com os dejetos e de NPK no tratamento com adubação mineral são apresentadas no quadro 2. As doses de dejetos e de NPK foram estabelecidas com base na recomendação de adubação orgânica e mineral da Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFSRS/SC, 2004). A dose de DLS foi determinada para fornecer aproximadamente 150 kg N total ha⁻¹ para o milho (149 - 162 kg N total ha⁻¹) e de 130 - 150 kg de N total ha⁻¹ para o trigo e aveia (133 - 156 kg N total ha⁻¹). A aplicação de P e K foi realizada em pré-semeadura, e o N, na forma de ureia foi parcelado, um terço em pré-semeadura e dois terços em cobertura.

A aplicação dos dejetos em superfície foi realizada manualmente com regadores com capacidade para 10 L. A injeção dos dejetos foi realizada utilizando-se um aplicador mecânico comercial (Modelo DAOL-i 4000 Tamdem, MEPEL). O equipamento era composto por um tanque metálico com capacidade de 4.000 L. A injeção era iniciada apenas após o acionamento de um pistão hidráulico responsável por inserir no solo o conjunto de 8 hastes de injeção tipo facão guilhotina (discos de corte e haste sulcadora), localizado na parte traseira do equipamento. As hastes sulcadoras de 2,0 cm de espessura possuíam ponteira substituível e eram espaçadas de 35 cm entre si e a profundidade de injeção variou de 8 a 11 cm.

O inibidor de nitrificação utilizado foi a dicianodiamida (DCD), o qual foi misturado aos dejetos na dose de 10 kg ha⁻¹. Nos tratamentos com DCD, o produto foi misturado aos dejetos em uma caixa d'água de 1000 L instantes antes da sua aplicação no solo. O milho foi semeado manualmente, em linhas espaçadas de 70 cm entre si, com uma população esperada de 75.000 plantas ha⁻¹. Em situações de déficit hídrico, a cultura foi irrigada por aspersão. A aveia e o trigo foram semeados mecanicamente com semeadora (Model SHM 1517, Semeato) em linhas espaçadas de 17 cm entre si e uma densidade de aproximadamente 350 plantas m².

Coleta e análise das plantas

O acúmulo de N pelas culturas foi avaliado na maturação fisiológica da cultura. No milho, foram coletadas quatro plantas na área útil de cada parcela, analisando-se separadamente a palha e os grãos. No trigo e na aveia, foram colhidos três segmentos de linha de 0,5 m linear, estabelecidos aleatoriamente dentro da área útil de cada parcela. A produção de MS das culturas foi obtida pela secagem das plantas em estufa a 65 °C até massa constante. As amostras secas da parte vegetativa foram pesadas para determinação do conteúdo de MS. Após a secagem, uma subamostra de grãos (milho e trigo apenas) e de palha foi moída em moinho de facas e depois em moinho de bolas (<100 mesh) para determinar a concentração de N total por combustão seca (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy). O restante dos resíduos culturais retornou a área de cada parcela.

Na aveia, em função do severo ataque de doenças logo após o início do enchimento dos grãos a cultura foi dessecada (glifosato), manejada com rolo faca como planta de cobertura, não sendo cultivada até a maturação fisiológica. Desse modo, as avaliações na aveia foram realizadas na mistura contendo palha e grãos em formação.

O rendimento de grãos de milho foi determinado em área de 14 m², colhendo-se as plantas de quatro linhas centrais de cada parcela, desprezando-se 0,5 m em cada extremidade. Para o trigo, colheram-se 14 linhas da área útil com 4 m de comprimento, totalizando 9,6 m² por parcela. A produção final de grãos das duas culturas foi corrigida para 13% de umidade.

Eficiência agronômica do N e a recuperação aparente de N

A eficiência agronômica e recuperação aparente de N pelas plantas nos tratamentos com dejetos líquidos de suínos e no tratamento com ureia foram estimadas a partir dos valores de acúmulo de N (grãos e resíduos culturais) e do rendimento de grãos, determinados na maturação fisiológica das culturas. A eficiência agronômica do N (EAN, kg de grãos kg⁻¹ de N aplicado) foi calculada através da Eq. 1 e a recuperação aparente do N (RAN, %) nos grãos e na palha foi calculada pela Eq. 2 (Craswell e Godwin, 1984). Essa estimativa da RAN considera que a mineralização do N da matéria orgânica do solo não é influenciada pelo N aplicado com os dejetos ou com a ureia (efeito “*priming*”) e, por isso, é denominada de recuperação aparente.

$$EAN = \frac{\text{Rendimento de grãos (tratamento)} - \text{rendimento de grãos (testemunha)}}{\text{N aplicado (tratamento)}} \quad (1)$$

$$RAN = \frac{\text{Acúmulo de N (tratamento)} - \text{Acúmulo de N (testemunha)}}{\text{N aplicado (tratamento)}} \times 100 \quad (2)$$

Análises estatísticas

Os resultados relativos à eficiência de uso do N e a produtividade das culturas foram submetidos à análise de variância usando o software Sisvar (version 5.3-Build 75) para cada cultivo individualmente e nos acumulados totais para a cultura do milho e de aveia/trigo. Contrastes ortogonais foram realizados para avaliar se houve diferença entre aplicar ou não fertilizante, fertilizante orgânico versus mineral, modo de aplicação dos DLS (injetado vs superficial) e a adição ou não de DCD.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito da aplicação de NPK mineral e dejetos líquidos de suínos

A aplicação de fertilizante mineral (NPK) ou orgânico (DLS) aumentou significativamente a produtividade e o acúmulo de N tanto no milho (Quadro 3) quanto nas culturas de inverno (Quadro 4), quando comparada ao tratamento testemunha sem aplicação de fertilizante. Na média dos quatro cultivos de milho e nos dois cultivos de trigo (2013 e 2015) a produtividade total de MS (palha e grãos) dos tratamentos com a aplicação de fertilizante superou o tratamento testemunha em 8 e 3 Mg ha⁻¹, respectivamente. O acúmulo de N na planta aumentou em média 88 kg N ha⁻¹ no milho, 50 kg N ha⁻¹ na aveia e 48 kg N ha⁻¹ no trigo. O efeito positivo da aplicação de DLS e fertilizante mineral está de acordo com diversos trabalhos realizados com as mesmas culturas do presente trabalho (Yagüe e Quílez, 2010a; Biau et al., 2012; Sieling et al., 2014; Schlegel et al., 2015), embora a magnitude de resposta varie em função, principalmente, das condições de solo e de clima predominantes em cada situação. Em um estudo realizado na Espanha, Yagüe e Quílez (2010a) constataram que a aplicação de DLS aumentou a produtividade total de MS de trigo em 6 Mg ha⁻¹ e o acúmulo de N em 42 kg N ha⁻¹. Em milho, Schlegel et al. (2015) verificaram que adubação da

cultura com fertilizante mineral ou com dejetos suínos aumentou a produtividade em 7 Mg ha^{-1} em relação ao tratamento testemunha, sem o uso de fertilizante.

As duas formas de adubação avaliadas no milho e nas culturas de inverno seguiram a recomendação para as culturas, com o N-ureia do tratamento com adubação mineral sendo fracionado entre a semeadura (1/3) e cobertura (2/3) e os dejetos sendo aplicados em dose única, em pré-semeadura. Apesar dessas diferenças, é possível comparar o desempenho das culturas diante das duas formas de adubação (mineral vs orgânica). No milho, se observa que em dois cultivos (2012/13 e 2014/15) nenhum dos atributos avaliados na cultura diferiu entre utilizar NPK mineral ou DLS. Já no primeiro cultivo de milho (2011/12) apenas o acúmulo de N na palha e o acúmulo total de N diferiram, com os DLS proporcionando melhores resultados do que o tratamento com NPK mineral. De modo similar, no milho 2013/14, os DLS apresentaram resultados de produtividade e acúmulo de N na palha e total significativamente superiores à adubação mineral. Os maiores valores apresentados nos tratamentos com a injeção dos DLS, determinaram as situações, em que a adubação orgânica superou a adubação mineral. É provável que, nessas situações, as condições ambientais predominantes tenham favorecido a perda de N por volatilização de NH_3 quando da aplicação da ureia em cobertura, enquanto a injeção dos dejetos protegeu o N da volatilização. Diversos estudos mostram perdas significativas de N, que podem chegar a 64% quando a ureia é aplicada na superfície do solo, sobre os resíduos culturais em plantio direto (Rochette et al., 2009b). A eficiência agrônômica do N (EAN) e a recuperação aparente do N (RAN) das duas fontes de fertilizante pelo milho não diferiram em nenhum dos cultivos avaliados.

Considerando os dois cultivos de trigo, onde, de modo semelhante ao milho, foi possível avaliar a produtividade e acúmulo de N na palha e nos grãos, se observa que esses dois atributos não diferiram entre as duas formas de adubação (Quadro 4). Apenas a eficiência agrônômica e a recuperação aparente do N aplicado diferiram, com valores maiores no tratamento NPK do que na média dos quatro tratamentos com DLS. Em 2013 a EAN do N-ureia superou a EAN do N-DLS em $2,1 \text{ kg grãos kg}^{-1} \text{ N}$, enquanto em 2015 a diferença em favor da ureia foi de $1,6 \text{ kg grãos kg}^{-1} \text{ N}$. Já a RAN no trigo em 2013 aumentou de 34,8%, na média dos tratamentos com DLS, para 45,8% no tratamento com ureia, enquanto em 2015 o aumento encontrado foi de 30,2% para 41,4%. O melhor desempenho do tratamento com ureia no trigo do que no milho se deve, provavelmente, as menores perdas de N por volatilização de NH_3 no tratamento com ureia no inverno, uma vez que esse processo físico-químico é favorecido em temperaturas elevadas (Huijsmans et al., 2003).

Os resultados obtidos com o milho e com as culturas de inverno confirmam o elevado potencial fertilizante dos DLS, evidenciando que a adubação mineral destas gramíneas pode ser substituída parcial ou totalmente pela adubação orgânica, com resultados equivalentes. Os resultados indicam também que a recomendação atual de adubação do milho e de cereais de inverno com DLS (CQFSRS/SC, 2004) está adequadamente estabelecida. A comparação entre adubar as culturas com DLS ou com fertilizantes minerais apresenta resultados variáveis na literatura, quanto ao suprimento de N e à produtividade, com valores similares entre adubação orgânica e mineral no trigo (Jensen et al., 2000), na cevada (Sieling, 2004) e no milho (Yagüe e Quílez, 2010b), com a adubação orgânica superando a mineral em trigo (Sieling et al., 2014) ou com a melhores resultados na adubação mineral em milho (Biau et al., 2012) e trigo (Meade et al., 2011). Tais diferenças devem estar relacionadas às particularidades de cada estudo, envolvendo o modo de aplicação dos dejetos no solo, as características dos dejetos e as condições de solo e clima.

Efeito do modo de aplicação dos DLS no solo

Com exceção da produtividade de palha do milho 2012/2013, nos demais atributos avaliados, tanto no milho (Quadro 3) como na aveia e no trigo (Quadro 4), a injeção dos DLS no solo superou a aplicação superficial, sendo que na maioria dos cultivos essa diferença foi significativa. Considerando a produtividade média de grãos de milho, o aumento promovido pela injeção dos DLS, em relação à aplicação superficial, variou de 0,8 Mg ha⁻¹ em 2014/15 a 2,0 Mg ha⁻¹ em 2012/13, com um aumento médio nos quatro cultivos de 1,5 Mg ha⁻¹. Esse incremento na produtividade de grãos de milho com a injeção dos DLS situa-se na faixa encontrada por outros autores, de 0,8 Mg ha⁻¹ (Schimitt et al., 1995) a 2,1 Mg ha⁻¹ (Sutton et al., 1982). Nos dois cultivos de trigo, a produtividade média de grãos com a injeção dos DLS aumentou em 0,3 Mg ha⁻¹, em relação à aplicação superficial. O acúmulo de N nos grãos de milho seguiu a mesma tendência observada na produtividade de grãos, com a injeção superando a aplicação superficial em 37 kg N ha⁻¹ na safra 2011/12 e 27 kg N ha⁻¹ em 2012/13. Na média dos quatro cultivos, o acúmulo de N nos grãos de milho foi 24 kg ha⁻¹ maior nos tratamentos com injeção do que nos tratamentos com aplicação superficial dos DLS. Embora menores do que no milho, o acúmulo médio de N nos grãos de trigo também foi maior com a injeção dos DLS (7 kg ha⁻¹) do que com a aplicação superficial. O efeito positivo observado no presente trabalho para a injeção dos DLS, superando a aplicação superficial, tanto na produtividade de grãos como no acúmulo de N, também é relatado em

cevada (Mooleki et al., 2002; Sorensen e Amato, 2002), milho (Ball Coelho et al., 2006; Russele et al., 2008; Federolf et al., 2016) e trigo (Mooleki et al., 2002; Nyord et al., 2012).

Os índices que avaliam a eficiência de uso de N pelas culturas (EAN e RAN) também foram significativamente maiores com a injeção dos DLS do que com a sua aplicação na superfície do solo (Quadros 3 e 4), evidenciando o benefício agrônômico dessa prática. Na média dos quatro cultivos de milho, a EAN aumentou de 27 kg de grão kg^{-1} N nos tratamentos com aplicação superficial dos DLS para 36 kg de grão kg^{-1} quando os DLS foram injetados. No trigo o aumento médio da EAN com a injeção dos DLS foi de 2 kg de grão kg^{-1} N aplicado. A superioridade da injeção, comparada à aplicação superficial de DLS, também é relatada por Ball Coelho et al. (2006), com valores que variaram entre 3 e 4,5 kg de grão kg^{-1} N, dependendo da dose de DLS aplicada. Quanto à RAN, observa-se nos quadros 3 e 4 que, no milho, ela aumentou de 46% na aplicação superficial para 68% na injeção (Quadro 3), enquanto no trigo o aumento foi de 28% para 38% (Quadro 4). O efeito positivo da injeção de DLS na eficiência de uso do N dos mesmos confirma resultados obtidos em pastagem (Groot et al., 2007; Klop et al., 2012), milho (Ball Coelho et al., 2006; Federolf et al., 2016), canola, trigo e cevada (Mooleki et al., 2002).

A volatilização de N na forma de amônia constitui a principal via de perda de N após a aplicação de dejetos de suínos na superfície do solo, sobre resíduos culturais (Chantigny et al., 2004; Rochette et al., 2009b). Ao aplicarem DLS em superfície, sobre resíduos culturais de trigo, Rochette et al., (2009b) verificaram que aproximadamente 50% do N amoniacal total aplicado com os DLS foi perdido por volatilização de NH_3 . No presente trabalho, mais de 70% do N presente nos dejetos encontrava-se na forma amoniacal (Quadro 1), o que explica o fato da injeção ter proporcionado melhores resultados no milho e nos cereais de inverno do que a aplicação superficial. A injeção dos dejetos no solo pode controlar eficientemente a volatilização de NH_3 , pois reduz à exposição dos dejetos aos efeitos da atmosfera (Dell et al., 2012; Nyord et al., 2012; Aita et al., 2014). No trabalho de Aita et al. (2014), os autores avaliaram a volatilização de NH_3 nas safras 2011/12 e 2012/13 do milho do presente estudo e constataram que, ao injetar os DLS no solo (8 a 11 cm) em pré-semeadura da cultura, a volatilização de NH_3 foi reduzida em aproximadamente 100%, quando comparada à aplicação superficial.

Portanto, o melhor desempenho do milho e do trigo com a injeção dos DLS deve estar associado principalmente ao controle da volatilização de NH_3 , uma vez que o N amoniacal que seria perdido para atmosfera é conservado no solo aumentando a sua disponibilidade às

culturas. No trabalho realizado por Bork et al. (2013), a injeção dos DLS a uma profundidade de 7,5 a 10 cm aumentou o N mineral do solo em 35%, em relação à sua aplicação em superfície. Outro aspecto que pode ter favorecido os tratamentos com injeção dos DLS é que ao localizar o N no interior do solo, mais próximo da zona de maior concentração de raízes, pode-se facilitar a absorção do N pelas plantas (Dell et al., 2011). Além disso, o maior contato com as partículas de solo dentro do sulco de injeção pode favorecer a fixação do NH_4^+ às partículas do solo, o qual pode ser disponibilizado gradualmente as culturas à medida que é liberado na solução do solo (Sorensen e Amato, 2002; Chantigny et al., 2004).

Além do benefício agrônômico, proporcionado pelos aumentos na produtividade e no acúmulo de N e do benefício ambiental, pela redução da volatilização de NH_3 , a injeção apresenta também como uma vantagem adicional o fato de possibilitar a aplicação dos dejetos em plantio direto, com mobilização do solo restrita aos sulcos de injeção dos DLS, preservando os resíduos culturais na superfície deste protegendo-o da erosão.

Efeito da adição do inibidor de nitrificação (DCD) aos DLS

Na cultura do milho, com exceção do cultivo 2014/15 em que a produtividade de grãos e a eficiência agrônômica aumentaram significativamente pelo uso de DCD, nos demais cultivos e em todos os atributos avaliados não houve efeito da adição de DCD aos DLS no momento da sua aplicação ao solo. Mesmo onde houve efeito positivo do inibidor de nitrificação, o aumento proporcionado pelo mesmo na produtividade de grãos e na EAN dos DLS foi de apenas $0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ (6,9%) e $3,6 \text{ kg grãos kg}^{-1} \text{ N}$ (16,9%) (Quadro 3). Nas culturas de inverno, a adição de DCD aos DLS não teve efeito na aveia e no trigo 2015 enquanto no trigo 2013 ela aumentou todos os atributos, com exceção do acúmulo de N na palha (Quadro 4). Considerando a produtividade total e o acúmulo total de N (palha + grãos) do trigo 2013, estes aumentaram em $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (15,2%) e $13,1 \text{ kg ha}^{-1}$ (12,3%) com o uso de DCD. Já a EAN e a RAN aumentaram de 8,9 para $11,6 \text{ kg grãos kg}^{-1} \text{ N}$ e de 30,5 para 39,1%, respectivamente.

A ausência de resposta ou o efeito positivo relativamente pequeno da adição da DCD aos DLS sobre o desempenho das culturas avaliadas contraria a hipótese inicial deste trabalho, embora isso também tenha sido constatado em outras situações envolvendo a adição de DCD a dejetos de suínos aplicados na superfície do solo no milho e no trigo (Schirmann et al., 2013). Resultados similares, porém utilizando DCD e ureia, foram obtidos anteriormente por Clay et al. (1990) em milho e por Harris et al. (2013) em trigo e canola.

Nos cultivos do milho em 2011/12 e 2012/13, Aita et al. (2014) avaliaram a evolução dos teores de N mineral no solo, além das perdas de N por volatilização de NH_3 e a emissão de óxido nitroso (N_2O) nos mesmos tratamentos do presente estudo. Os autores constataram que a injeção dos DLS praticamente eliminou as perdas de N por volatilização, mas aumentou as perdas de N_2O por desnitrificação em $3570 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ (138%), em relação à aplicação superficial. Além disso, em 2011/12, o uso da DCD reduziu a taxa de oxidação do N amoniacal dos DLS, principalmente no primeiro mês, mantendo o N dos DLS na forma de NH_4^+ , o que reduziu a emissão de N_2O , produzido durante a nitrificação e/ou desnitrificação. Em 2012/13 esse efeito da DCD foi menos evidente, provavelmente em função de uma chuva de aproximadamente 50 mm, ocorrida dois dias após a aplicação dos dejetos no campo, que pode ter lixiviado a DCD. Uma das características da DCD é a sua elevada solubilidade em água, o que pode reduzir o seu efeito inibitório sobre a nitrificação, já que a água da chuva pode separar o inibidor do N amoniacal dos dejetos, que é menos móvel no solo (Shepherd et al., 2012). Com base nesses resultados de Aita et al. (2014) era de se esperar que o uso da DCD aumentasse o acúmulo de N e a produtividade do milho, especialmente na safra 2011/12.

Apesar do benefício da DCD na redução das emissões de N_2O após a aplicação de DLS, constatado por Aita et al. (2014), uma das principais razões para a ausência de resposta ao uso do inibidor no acúmulo de N e produtividade nos quatro cultivos de milho e no trigo 2015 pode estar ligada ao fato da quantidade de N remanescente no solo, após a ocorrência das perdas de N por volatilização de amônia e desnitrificação (N_2O , NO e N_2) ter sido suficientemente elevada para atender a demanda deste nutriente pelas culturas, em razão do potencial produtivo proporcionado pelas condições de clima e solo da área experimental. Outra razão pode estar ligada à elevação da temperatura do ar nos primeiros dias após a aplicação dos tratamentos, para valores acima da média histórica dos últimos 30 anos (Figura 1). Por ser um produto biodegradável, essa elevação na temperatura pode ter contribuído para reduzir o tempo de meia vida da DCD no solo, reduzindo então a sua capacidade de inibir a nitrificação, deixando o N susceptível as perdas por desnitrificação (N_2O , NO e N_2) e lixiviação na forma de NO_3^- (Zaman et al., 2009; O'Connor et al., 2012). Resultados obtidos por Di e Cameron (2004) em condições controladas de laboratório mostram que, quando a temperatura aumentou de 8°C para 20°C , o tempo de meia vida da DCD diminuiu de 111-116 dias para apenas 18-25 dias. Com a redução do período inibitório da nitrificação pela DCD, cuja taxa de degradação no solo dobra a cada 10°C de aumento na temperatura

(Rajbanshi et al., 1992), diminui o tempo de permanência do N inorgânico na forma de NH_4^+ e ocorre o rápido aparecimento de NO_3^- , o qual, através das precipitações e irrigações que ocorreram no período experimental, pode ter sido lixiviado para além da zona de absorção ativa das raízes, reduzindo então a efetividade da DCD em aumentar a disponibilidade de N às plantas. Portanto, a combinação da ocorrência de temperaturas elevadas e de chuvas após a aplicação dos DLS e o adequado suprimento da demanda das culturas em N, mesmo após as perdas ocorridas (Cookson; Conforth, 2002), podem ser apontadas como as causas principais da ausência de resposta das culturas à adição de DCD aos DLS.

Contrariamente aos outros cultivos, no trigo 2013, onde houve efeito positivo da DCD em quase todos os atributos avaliados na cultura, não houve elevação da temperatura e o volume de chuvas no primeiro mês após a aplicação dos tratamentos foi pequeno (Figura 1), o que pode ter contribuído para aumentar o efeito inibitório da DCD sobre a nitrificação do N amoniacal dos DLS. Ao inibir a nitrificação a DCD preserva o N na forma de NH_4^+ por maior período de tempo mantendo-o mais acessível à absorção pelo trigo. Além disso, Watson e Miller (1996) ressaltam que o custo energético para absorção do N- NH_4^+ pelas plantas é menor, quando comparado ao N- NO_3^- . Esse efeito é confirmado por outros trabalhos mostrando que a DCD aumentou a produtividade e o acúmulo de N quando aplicada ao solo juntamente com dejetos suínos (Federolf et al., 2016), bovinos em milho (Schröder et al., 1993), e com urina em pastagem (Moir et al., 2012; Shepherd et al., 2014). Tais resultados reforçam a recomendação de Vallejo et al. (2005) de que para maximizar a efetividade da DCD ela deve ser aplicada preferencialmente em climas com temperatura amena e seguido por períodos com baixa precipitação.

Efeito cumulativo dos tratamentos

Além do efeito dos tratamentos sobre cada cultivo de milho e das culturas de inverno, apresentado e discutido anteriormente, o efeito dos tratamentos também foi comparado globalmente, considerando-se os valores acumulados (quatro cultivos de milho no verão; um cultivo de aveia e dois de trigo no inverno) para cada um dos atributos avaliados (Quadro 5). Considerando os dois principais aspectos em avaliação (efeito do modo de aplicação dos DLS no solo e efeito do inibidor de nitrificação) se observa que, tanto no milho quanto nas culturas de inverno a injeção dos DLS mostrou-se superior à aplicação superficial. No somatório dos quatro cultivos do milho, a injeção aumentou a produção total de grãos, em relação à aplicação superficial de 36,1 para 41,9 Mg ha^{-1} , o acúmulo de N nos grãos de 422,1 para

519,0 kg ha⁻¹, a EAN de 26,6 para 35,7 kg grãos kg⁻¹ N e a RAN de 45,9 para 68,2%. Tais resultados indicam que a injeção dos DLS no solo em SPD pode ser indicada como alternativa à prática tradicionalmente empregada nas regiões dedicadas à suinocultura, que consiste em aplicar os dejetos na superfície do solo. Por essa razão, pode ajudar a suinocultura a atender uma legislação ambiental cada vez mais restritiva.

Quanto ao efeito global da adição de DCD aos dejetos, observa-se que no milho o inibidor não afetou significativamente nenhum dos atributos avaliados. Todavia, nas culturas de inverno o efeito cumulativo foi distinto, com a DCD aumentando todos os atributos (Quadro 5). O aumento observado foi de 1,9 Mg ha⁻¹ na produtividade total, de 29,9 kg ha⁻¹ no N acumulado total e de 1,5 kg grãos kg⁻¹ N na EAN. O valor da RAN aumentou de 34,2 para 41,1% com o uso da DCD. Esses resultados do efeito cumulativo da adição de DCD aos DLS indicam que, embora significativas, as respostas ao seu uso são pequenas e se limitam à algumas situações e culturas de inverno, onde as condições ambientais são menos favoráveis à degradação do produto. O fato da eficiência da DCD depender de vários fatores, como temperatura (Kim et al., 2012), regime de precipitação pluviométrica (Shepherd et al., 2014), características de solo (McGeough et al., 2015), além da forma como o produto é aplicado aos dejetos no solo (McCormick et al., 1984; Schimitt et al., 1995) evidencia a necessidade de ampliar os estudos com esse produto para as condições de solo e clima do Sul do Brasil. Além de avaliar aspectos agronômicos e ambientais (efeito da DCD sobre emissões gasosas de N) também é preciso avaliar aspectos econômicos, uma vez que o produto não é produzido no Brasil e precisa ser importado.

4.5 CONCLUSÕES

A injeção subsuperficial dos DLS no solo em SPD aumenta a eficiência de uso do N dos DLS pelas culturas do milho, aveia e trigo impactando positivamente o acúmulo de N e a produtividade dessas culturas em comparação à aplicação dos dejetos em superfície.

A eficiência do inibidor de nitrificação DCD pode ser comprovada apenas em um dos cultivos de trigo no inverno, não tendo efeito nos cultivos de milho no verão.

4.6 REFERÊNCIAS

Aita C, Gonzatto R, Miola ECC, Santos DB, Rochette P, Angers DA, Chantigny MH, et al. Injection of DCD-treated pig slurry reduced NH₃ volatilization without enhancing soil N₂O

emissions from no-till corn in southern Brazil. *J Environ Qual.* 2014;43:789-800. doi:10.2134/jeq2013.07.0301

Ball Coelho BR, Roy RC, Bruin AJ. Nitrogen recovery and partitioning with different rates and methods of sidedressed manure. *Soil Sci Soc Am. J.* 2006;70:464-473. doi:10.2136/sssaj2005.0122

Bork, EW, Lambert BD, Banerjee S, Blonski LJ. Soil mineral nitrogen responses following liquid hog manure application to semiarid forage lands. *Can J Soil Sci.* 2013;93:369-378. doi:10.4141/CJSS2013-002

Biau A, Santiveri F, Mijangos I, Lloveras J. The impact of organic and mineral fertilizers on soil quality parameters and the productivity of irrigated maize crops in semiarid regions. *Eur J Soil Biol.* 2012;53:56-61. doi:10.1016/j.ejsobi.2012.08.008

Bundy LG, Bremner JM. Inhibition of nitrification in soils. *Soil Sci Soc Am J.* 1973;37:396-398. doi:http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700030025x

Chantigny MH, Angers DA, Morvan T, Pomar C. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ¹⁵N. *Soil Sci Soc Am J.* 2004;68:637-643. doi:10.2136/sssaj2004.6370

Chantigny MH, Angers DA, Rochette P, Bélanger G, Massé D. Gaseous nitrogen emissions and forage nitrogen uptake on soils fertilized with raw and treated swine manure. *J Environ Qual.* 2007;36:1864-1872. doi:10.2134/jeq2007.0083.

Clay DE, Malzer GL, Anderson JL. Tillage and dicyandiamide influence on nitrogen fertilizer immobilization, remineralization, and utilization by maize (*zea mays* L.). *Biol Fertil Soils.* 1990;9:220-225. doi:10.1007/BF00336229

Cookson WR, Cornforth IS. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield. *Soil Biology Biochemistry.* 2002;34:1461-1465. doi: 10.1016/S0038-0717(02)00090-1

Craswell ET, Godwin DG. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates. In: Tinker PB, Lauchil A (eds) *Adv Plant Nutr*, vol 1, Praeger Publishers, USA, 1984;pp 1-56.

De Conti L, Ceretta CA, Ferreira PAA, Lorensini F, Lourenzi CR, Vidal RF, Tassinari A, Brunetto G. Effects of pig slurry application and crops on phosphorus content in soil and the chemical species in solution. *R Bras Ci Solo*. 2015;39:774-787. doi:10.1590/01000683rbc20140452

Dell CJ, Meisinger JJ, Beegle DB. Subsurface application of manures slurries for conservation tillage and pasture soils and their impact on the nitrogen balance. *J Environ Qual*. 2011;40:352-361. doi:10.2134/jeq2010.0069

Dell CJ, Kleinman PJA, Schmidt JP, Beegle DB. Low-Disturbance manure incorporation effects on ammonia and nitrate loss. *J Environ Qual*. 2012;41:928-937. doi:10.2134/jeq2011.0327

Di HJ, Cameron KC. Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate and microbial biomass in a grazed pasture soil. *Soil Research*. 2004;42:927-932. doi:http://dx.doi.org/10.1071/SR04050

Federolf C-P, Westerschulte M, Olf H-W, Broll G, Trautz D. Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany. *Europ J Agronomy*. 2016;75:130-138. doi:10.1016/j.eja.2016.01.016

Giroto E, Ceretta CA, Lourenzi CR, Lorensini F, Tiecher TL, Vieira RCB, Trentin G, Basso CJ, Miotto A, Brunetto G. Nutrient transfers by leaching in a no-tillage system through soil treated with repeated pig slurry applications. *Nutr Cycl Agroecosyst*. 2013;95:115-31.

Groot JCJ, Van Der Ploeg JD, Verhoeven FPM, Lantinga EA. Interpretation of results from on-farm experiments: manure-nitrogen recovery on grassland as affected by manure quality and application technique. 1. An agronomic analysis. *NJAS - Wagen J Life Scien*. 2007;54:235-254. doi:10.1016/S1573-5214(07)80017-0

Harris RH, Officer SJ, Hill PA, Armstrong RD, Fogarty KM, Zollinger RP, Phelan AJ, Partington DL. Can nitrogen fertiliser and nitrification inhibitor management influence N₂O

losses from high rainfall cropping systems in South Eastern Australia?. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2013;95:369-285. doi:10.1007/s10705-013-9562-0

Huijsmans JFM, Hol JMG, Vermeulen GD. Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. *Atmos Environ.* 2003;37:3669-3680. doi:10.1016/S1352-2310(03)00450-3

Jensen LS, Pedersen IS, Hansen TB, Nielsen NE. Turnover and fate of ¹⁵N-labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. *Eur J Agron.* 2000;12:23-35. doi:10.1016/S1161-0301(99)00040-4

Kim DG, Giltrap D, Sagar S, Palmada T, Berben P, Drysdale D. Fate of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) sprayed on a grazed pasture: effect of rate and time of application. *Soil Research.* 2012;50:337-347. doi:10.1071/SR12069

Klop G, Velthof GL, van Groenigen JW. Application technique affects the potential of mineral concentrates from livestock manure to replace inorganic nitrogen fertilizer. *Soil Use Manag.* 2012;28:468-477. doi: 10.1111/j.1475-2743.2012.00434.x

Lambert BD, Bork EW. Ammonia volatilization trends following liquid hog manure application to forage land. *J Soil Water Conserv.* 2003;58:207-213.

Maguire RO, Kleinman PJA, Dell CJ, Beegle DB, Brandt RC, McGrath JM, Ketterings QM. Manure application technology in reduced tillage and forage systems: A Review. *J Environ Qual.* 2011;40:292-301. doi:10.2134/jeq2009.0228

McCormick RA, Nelson DW, Sutton AL, Huber DM. 1984. Increased N efficiency from nitrapyrin added to liquid swine manure used as a fertilizer for corn. *Agron J.* 1984;76:1010-1014 doi:10.2134/agronj1984.00021962007600060034x.

McGeough KL, Watson CJ, Müller C, Laughlin RJ, Chadwick DR. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. *Soil Biol Biochem.* 2015;94:222-232. doi:10.1016/j.soilbio.2015.11.017

Meade G, Lalor STJ, McCabe T. An evaluation of the combined usage of separated liquid pig manure and inorganic fertiliser in nutrient programmes for winter wheat production. *Eur J Agron.* 2011;34:62-70. doi:10.1016/j.eja.2010.10.005

Moir JL, Malcolm BJ, Cameron KC, Di HJ. The effect of dicyandiamide on pasture nitrate concentration, yield and N offtake under high N loading in winter and spring. *Grass Forage Sci.* 2012;67:391-402. doi:10.1111/j.1365-2494.2012.00857.x

Mooleki SP, Schoenau JJ, Hultgreen G, Wen G, Charles JL. Effect of rate, frequency and method of liquid swine manure application on soil nitrogen availability, crop performance and N use efficiency in east-central Saskatchewan. *Can J Soil Sci.* 2002;82:57-467.

Moreno JA. *Clima do Rio Grande do Sul.* Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia, 1961. 46p.

Nyord T, Sogaard HT, Hansen MN, Jensen LS. Injection methods to reduce ammonia emission from volatile liquid fertilisers applied to growing crops. *Bios Eng.* 2008;100:235-244. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.01.013

Nyord T, Hansen MN, Birkmose TS. Ammonia volatilisation and crop yield following land application of solid-liquid separated, anaerobically digested, and soil injected animal slurry to winter wheat. *Agric Ecosyst Environ.* 2012;160:75-81. doi:10.1016/j.agee.2012.01.002

O'Connor PJ, Hennessy D, Brophy C, O'Donovan M, Lynch MB. The effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on herbage production when applied at different times and rates in the autumn and winter. *Agric Ecosyst Environ.* 2012;152:79-89. doi:10.1016/j.agee.2012.02.014

Perälä P, Kapuinen P, Esala M, Tyynelä S, Regina K. Influence of slurry and mineral fertilizer application techniques on N₂O and CH₄ fluxes from a barley field in southern Finland. *Agric Ecosyst Environ.* 2006;117:71-78. doi:10.1016/j.agee.2006.03.027

Rajbanshi SS, Benckiser G, Ottow JCG. Effects of concentration, incubation temperature, and repeated applications on degradation kinetics of dicyandiamide (DCD) in model experiment with a silt loam soil. *Biol Fertil Soils.* 1992;13:61-64. doi: 10.1007/BF00337336

Rochette P, Angers DA, Chantigny MH, MacDonald JD, Bissonnette N, Bertrand N. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: a laboratory comparison. *Soil Tillage Res.* 2009a;103:310–315 doi:10.1016/j.still.2008.10.028

Rochette P, Angers DA, Chantigny MH, MacDonald D, Gasser M, Bertrand N. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2009b;84:71-80. doi:10.1007/s10705-008-9227-6

Russelle M, Blanchet K, Randall G, Everett L. Nitrogen availability from liquid swine and dairy manure: results of on-farm trials in Minnesota. Disponível em: <<http://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrientmanagement/nitrogen/nitrogenavailability-from-liquid-swine-and-dairy-manure/>>. Acesso em 04 fev. 2015.

Schirmann J, Aita C, Giacomini SJ, Pujol SB, Giacomini DA, Gonzatto R, Olivo J. Inibidor de nitrificação e aplicação parcelada de dejetos de suínos nas culturas do milho e trigo. *R Bras Ci Solo.* 2013;37:271-280. doi:10.1590/S0100-06832013000100028

Schlegel AJ, Assefa Y, Bond HD, Wetter SM, Stone LR. Corn response to long term applications of cattle manure, swine effluent, and inorganic nitrogen fertilizer. *Agron J.* 2015;107:1701-1710. doi:10.2134/agronj14.0632

Schmitt MA, Evans SD, Randall GW. Effect of liquid swine manure application methods on soil nitrogen and corn grain yields. *J Prod Agric.* 1995;8:186-189. doi: 10.2134/jpa1995.0186

Shepherd M, Wyatt J, Welten B. Effect of soil type and rainfall on dicyandiamide concentrations in drainage from lysimeters. *Soil Research.* 2012;50:67-75. doi: <http://dx.doi.org/10.1071/SR11330>

Sieling K. Growth stage-specific application of slurry and mineral N to oilseed rape, wheat and barley. *J Agric Sci.* 2004;142:495–502. doi:10.1017/S0021859604004757

Sieling K, Ni K, Kage H. Application of pig slurry-First year and residual effects on yield and N balance. *Europ J Agron.* 2014;59:13-21. doi:10.1016/j.eja.2014.05.003.

Sørensen SG, Amato M. Remineralization and residual effects of N application of pig slurry to soil. *Eur J Agron*. 2002;16:81-95. doi:10.1016/S1161-0301(01)00119-8

Sutton AL, Nelson DW, Hoff JD, Mayrose VB. Effects of injection and surface applications of liquid swine manure on corn yield and soil composition. *J Envir Qual*. 1982;11:468-472. doi: 10.2134/jeq1982.00472425001100030030x

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. *Análise de solos, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

Vallejo A, García-Torres L, Díez JA, Arce A, López-Fernández S. Comparison of N losses (NO_3^- , N_2O , NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate. *Plant Soil*. 2005;272:313-325. doi:10.1007/s11104-004-5754-3

Velthof, GL, Mosquera J. The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. *Agric Ecosyst Environ*. 2011;140:298-308. doi:10.1016/j.agee.2010.12.017

Watson JC, Miller H. Short-term effects of urea amended with the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on perennial ryegrass. *Plant Soil*. 1996;184:33-45. doi: 10.1007/BF00029272

Welten BG, Ledgard SF, Schipper LA, Judge AA. Effect of amending cattle urine with dicyandiamide on soil nitrogen dynamics and leaching of urinary-nitrogen. *Agric Ecosyst Environ*. 2013;167:12:22. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.01.011>

Wulf S, Maeting M, Clemens J. Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: II. Greenhouse gas emissions. *J Environ Qual*. 2002;31:1795-1801. doi:10.2134/jeq2002.1795

Yagüe MR, Quílez D. Direct and residual response of wheat to swine slurry application method. *Nutr. Cycling Agroecosyst*. 2010a;86:161-174. doi:10.1007/s10705-009-9280-9.

Yagüe MR, Quílez D. Response of maize yield, nitrate leaching, and soil nitrogen to pig slurry combined with mineral nitrogen. *J Environ Qual.* 2010b;39:686-696. doi:10.2134/jeq2009.0099.

Zaman M, Saggar S, Blennerhassett JD, Singh J. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biol Biochem.* 2009;41:1270-1280. doi:10.1016/j.soilbio.2009.03.011

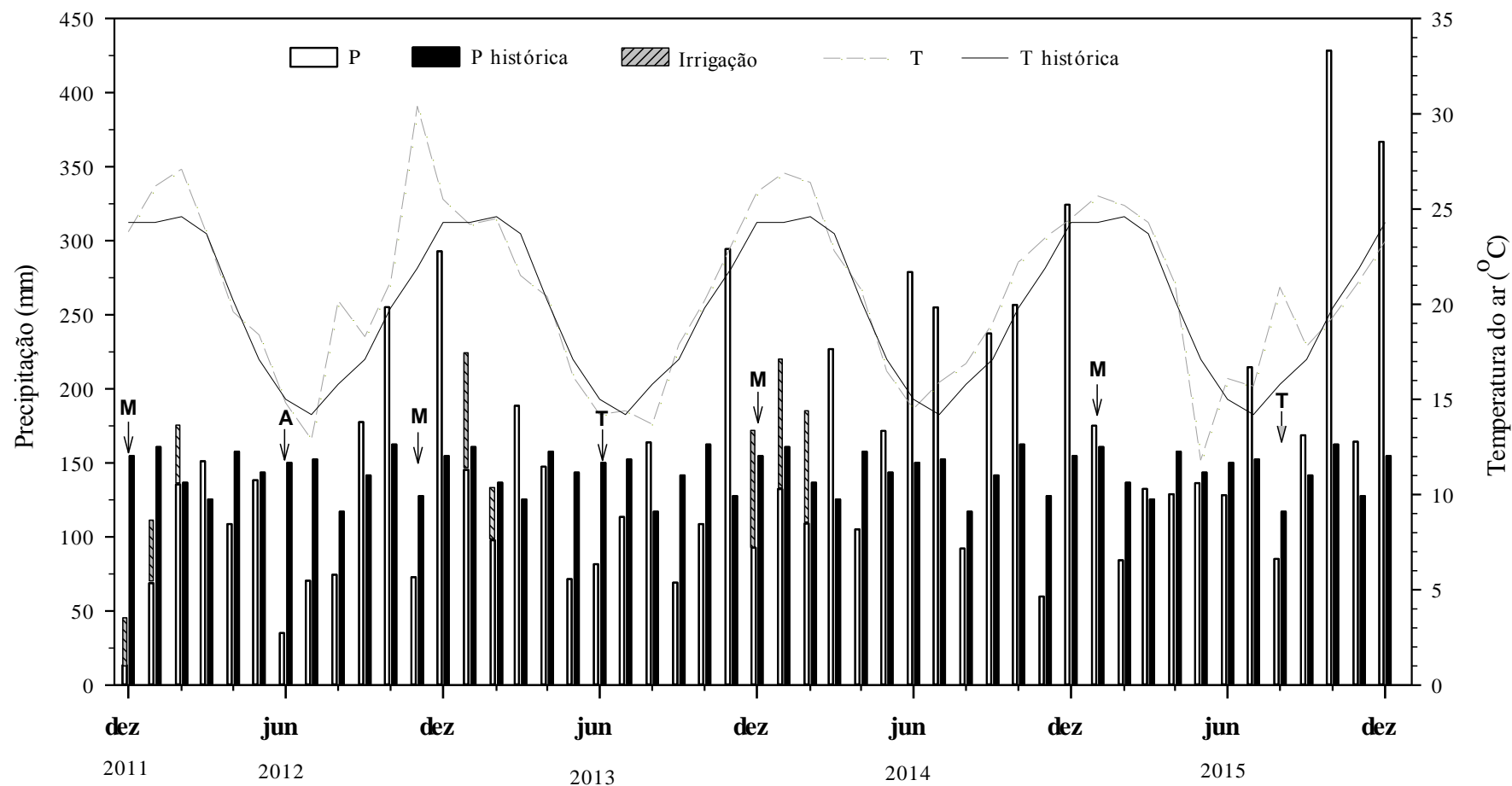


Figura 1. Precipitação (P) e irrigação mensal, temperatura (T) média diária durante o período experimental (2011 - 2015) e média histórica dos últimos 30 anos (1981-2010). As letras e setas indicam o mês de instalação de cada experimento e a cultura semeada (M: milho, A: aveia e T: trigo).

Quadro 1. Calendário de atividades durante o período experimental.

Operações	Milho 2011/12	Aveia 2012	Milho 2012/13	Trigo 2013	Milho 2013/14	Milho 2014/15	Trigo 2015
Aplicação dos dejetos	01 Dez 2011	12 Jun 2012	20 Nov 2012	06 Jun 2013	12 Dez 2013	06 Jan 2015	04 Ago 2015
Semeadura das culturas	03 Dez 2011	12 Jun 2012	22 Nov 2012	08 Jun 2013	16 Dez 2013	07 Jan 2015	11 Ago 2015
Aplicação da ureia							
Pré-semeadura	03 Dez 2011	12 Jun 2012	20 Nov 2012	06 Jun 2013	12 Dez 2013	06 Jan 2015	04 Ago 2015
Cobertura	05 Jan 2012	24 Jul 2012	14 Dez 2012	11 Jul 2013	12 Jan 2014	30 Jan 2015	12 Set 2015
Colheita	05 Mai 2012	24 Set 2012	24 Abr 2013	05 Nov 2013	14 Abr 2014	02 Jul 2015	01 Dez 2015

Quadro 2. Principais características dos dejetos líquidos de suínos (DLS) (dados expressos em base úmida), dose de DLS e quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) aplicadas com os dejetos e com o fertilizante mineral em cada cultura.

Características	Milho 2011/12	Aveia 2012	Milho 2012/13	Trigo 2013	Milho 2013/14	Milho 2014/15	Trigo 2015
Dejetos líquidos de suínos							
Matéria seca, g L ⁻¹	27,0	37,0	23,0	41,1	23,0	22,8	16,0
C total, g L ⁻¹	7,02	12,81	7,33	10,79	4,02	5,00	2,09
N total, g L ⁻¹	2,99	3,90	3,28	3,76	3,29	2,80	2,60
NAT ⁽¹⁾ , g L ⁻¹	2,35	2,80	2,42	2,75	2,60	2,00	1,80
pH	8,20	6,10	7,20	6,90	7,60	6,80	8,60
Dose de DLS, m ³ ha ⁻¹	50,0	40,0	49,5	40,0	49,0	58,0	51,0
N total, kg ha ⁻¹	149,5	156,0	162,3	150,4	161,4	162,5	132,6
NAT, kg ha ⁻¹	117,5	112,0	119,8	110,0	127,4	116,0	91,8
P total, kg ha ⁻¹	15,8	22,8	17,7	18,1	22,8	20,6	20,9
K, kg ha ⁻¹	75,1	119,7	173,6	60,8	100,3	85,6	78,1
Fertilizante mineral							
N-ureia ⁽²⁾ , kg ha ⁻¹	130	130	130	120	130	130	110
K ₂ O, kg ha ⁻¹	90	60	90	90	90	90	90
P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹	125	60	125	125	125	125	125

⁽¹⁾ NAT = N amoniacal total (NH₃ + NH₄⁺). ⁽²⁾ Dose total de N-ureia foi dividida 1/3 em pré-semeadura da cultura e 2/3 em cobertura.

Quadro 3. Produtividade, acúmulo de N, eficiência agrônômica do N (EAN) e recuperação aparente do N (RAN) pelo milho após a aplicação superficial e injetada de dejetos líquidos de suínos no solo, com e sem o inibidor de nitrificação dicianodiamida, em plantio direto.

Tratamento ⁽¹⁾	Produtividade			Acúmulo de N			EAN	RAN
	Palha	Grãos	Total	Palha	Grãos	Total		
	— Mg ha ⁻¹ —			— kg ha ⁻¹ —			kg grão kg ⁻¹ N	- % -
Milho 2011/12								
Testemunha (A)	9,0	5,9	14,9	34,7	58,5	93,2	-	-
NPK (B)	10,3	9,6	19,9	43,3	107,2	150,5	28,6	44,1
DLSs (C)	10,7	9,8	20,6	47,5	104,8	152,3	26,3	39,5
DLSs + DCD (D)	11,3	8,9	20,2	48,9	92,2	141,0	20,3	32,0
DLSi (E)	12,1	11,0	23,1	69,8	130,9	200,7	33,9	71,9
DLSi + DCD (F)	11,1	11,6	22,7	66,1	140,6	206,7	38,3	75,9
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	*	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns
C, D x E, F	ns	**	*	**	**	**	**	**
C, E x D, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Milho 2012/13								
Testemunha (A)	6,5	4,5	10,9	25,5	45,9	71,4	-	-
NPK (B)	10,5	10,6	21,1	55,3	122,0	177,3	47,3	81,5
DLSs (C)	10,2	10,5	20,7	50,7	122,2	172,9	37,1	62,6
DLSs + DCD (D)	11,3	9,9	21,2	57,7	107,6	165,3	33,7	57,8
DLSi (E)	10,3	12,7	23,0	64,0	148,0	212,0	50,3	86,6
DLSi + DCD (F)	10,0	11,8	21,8	59,5	135,7	195,2	45,1	76,3
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C, D x E, F	ns	**	ns	ns	**	**	**	*
C, E x D, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Milho 2013/14								
Testemunha (A)	5,5	3,6	9,1	26,8	41,0	67,9	-	-
NPK (B)	6,7	8,1	14,8	32,6	100,0	132,5	34,9	45,8
DLSs (C)	7,9	8,0	15,9	37,5	93,7	131,1	27,1	39,2
DLSs + DCD (D)	8,8	7,8	16,6	42,5	91,0	133,5	26,3	40,7
DLSi (E)	10,1	8,6	18,7	48,2	98,1	146,2	31,1	48,6
DLSi + DCD (F)	9,8	9,5	19,3	52,7	108,7	161,5	36,5	58,0
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	**	ns	**	**	ns	*	Ns	ns
C, D x E, F	**	**	**	**	*	**	**	**
C, E x D, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Ns	ns
Milho 2014/15								
Testemunha (A)	5,0	5,2	10,2	25,8	58,2	84,0	-	-
NPK (B)	8,2	8,5	16,7	45,0	116,5	161,5	25,4	59,6
DLSs (C)	7,6	8,4	16,0	44,0	112,0	156,0	19,6	44,3
DLSs + DCD (D)	7,9	8,8	16,7	43,4	120,9	164,3	22,0	49,4
DLSi (E)	8,1	8,9	17,1	51,1	130,5	181,5	23,1	60,0
DLSi + DCD (F)	7,7	9,7	17,4	51,4	145,6	197,0	27,8	69,5
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C, D x E, F	ns	**	ns	**	**	**	**	**
C, E x D, F	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns

⁽¹⁾ DLSs: Dejetos líquidos de suínos aplicados em superfície; DLSi: Dejetos líquidos de suínos injetados; DCD: Dicianodiamida. * e ** contraste significativo ao nível de 0,05 e 0,01, respectivamente. ns: não significativo.

Quadro 4. Produtividade, acúmulo de N, eficiência agrônômica do N (EAN) e recuperação aparente do N (RAN) pela aveia e trigo após a aplicação superficial e injetada de dejetos líquidos de suínos no solo, com e sem o inibidor de nitrificação dicianodiamida, em plantio direto.

Tratamento ⁽¹⁾	Produtividade			Acúmulo de N			EAN	RAN
	Palha	Grão	Total	Palha	Grão	Total		
	----- Mg ha ⁻¹ -----			----- kg ha ⁻¹ -----			kg grão kg ⁻¹ N	- % -
Aveia 2012								
Testemunha (A)	-	-	3,8	-	-	52,7	-	-
NPK (B)	-	-	4,9	-	-	84,0	-	24,0
DLSs (C)	-	-	5,3	-	-	95,1	-	27,2
DLSs + DCD (D)	-	-	5,5	-	-	107,7	-	35,2
DLSi (E)	-	-	5,5	-	-	106,2	-	34,3
DLSi + DCD (F)	-	-	5,8	-	-	122,2	-	44,5
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	-	-	**	-	-	**	-	-
B x C, D, E, F	-	-	*	-	-	**	-	*
C, D x E, F	-	-	ns	-	-	ns	-	ns
C, E x D, F	-	-	ns	-	-	ns	-	ns
Trigo 2013								
Testemunha (A)	4,6	2,5	7,1	17,3	43,1	60,4	-	-
NPK (B)	6,3	4,0	10,2	31,1	84,3	115,3	12,3	45,8
DLSs (C)	5,8	3,8	9,6	29,6	75,7	105,3	8,4	29,9
DLSs + DCD (D)	6,4	4,0	10,4	31,5	79,5	111,0	9,7	33,6
DLSi (E)	6,2	3,9	10,1	31,0	76,2	107,2	9,3	31,1
DLSi + DCD (F)	7,8	4,5	12,3	37,6	90,1	127,7	13,4	44,7
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**
C, D x E, F	**	*	**	ns	ns	*	**	*
C, E x D, F	**	**	**	ns	**	**	**	**
Trigo 2015								
Testemunha (A)	1,4	1,0	2,4	10,3	19,4	29,7	-	-
NPK (B)	3,8	1,9	5,7	33,2	42,0	75,2	8,2	41,4
DLSs (C)	3,3	1,8	5,1	23,8	37,1	60,9	5,8	22,5
DLSs + DCD (D)	3,6	1,7	5,3	27,7	36,4	64,1	5,3	25,0
DLSi (E)	3,8	1,9	5,7	36,2	42,7	78,9	7,0	36,1
DLSi + DCD (F)	3,7	2,1	5,8	33,9	46,7	80,6	8,2	37,4
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**
C, D x E, F	ns	**	**	**	**	**	**	**
C, E x D, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾ DLSs: Dejetos líquidos de suínos aplicados em superfície; DLSi: Dejetos líquidos de suínos injetados; DCD: Dicianodiamida. * e ** contraste significativo ao nível de 0,05 e 0,01, respectivamente. ns: não significativo.

Quadro 5. Efeito cumulativo da aplicação superficial e injetada de dejetos líquidos de suínos, com e sem dicianodiamida sobre a produtividade, nitrogênio acumulado, eficiência agrônômica do N (EAN) e recuperação aparente do N (RAN) pelo milho, aveia e trigo em plantio direto.

Tratamento ⁽¹⁾	Produtividade			N acumulado			EAN	RAN
	Palha	Grão	Total	Palha	Grão	Total		
	———— Mg ha ⁻¹ ————			———— kg ha ⁻¹ ————			kg grão kg ⁻¹ N	— % —
Milho								
Testemunha (A)	26,0	19,2	45,2	112,8	203,6	316,4	-	-
NPK (B)	35,7	36,8	72,5	176,2	445,7	621,9	33,8	58,8
DLSs (C)	36,4	36,7	73,1	179,7	432,7	612,4	27,5	46,6
DLSs + DCD (D)	39,3	35,4	74,7	192,5	411,7	604,2	25,5	45,3
DLSi (E)	40,6	41,2	81,8	233,1	507,5	740,6	34,6	66,7
DLSi + DCD (F)	38,6	42,6	81,2	229,7	530,6	760,3	36,8	69,8
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	**	ns	**	**	ns	**	ns	ns
C, D x E, F	ns	**	**	**	**	**	**	**
C, E x D, F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Aveia e trigo								
Testemunha (A)	9,8	3,5	13,3	80,3	62,5	142,8	-	-
NPK (B)	15,0	5,9	20,8	148,2	126,3	274,5	10,3	41,1
DLSs (C)	14,4	5,5	19,9	148,6	112,7	261,3	7,4	30,7
DLSs + DCD (D)	15,5	5,6	21,2	166,9	115,9	282,8	7,6	35,6
DLSi (E)	15,6	5,8	21,4	173,3	119,0	292,3	8,2	37,8
DLSi + DCD (F)	17,3	6,6	23,9	193,6	136,8	330,5	11,0	46,5
Contrastes								
A x B, C, D, E, F	**	**	**	**	**	**	-	-
B x C, D, E, F	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C, D x E, F	**	**	**	**	**	**	**	**
C, E x D, F	**	*	**	*	*	**	*	**

⁽¹⁾ DLSs: Dejetos líquidos de suínos aplicados em superfície; DLSi: Dejetos líquidos de suínos injetados; DCD: Dicianodiamida. * e ** contraste significativo ao nível de 0,05 e 0,01, respectivamente. ns: não significativo.

5 DISCUSSÃO GERAL

Os resultados apresentados no artigo I e II evidenciam que a injeção dos DLS em solos manejados em SPD é uma alternativa de manejo eficiente do ponto de vista agrônomo, pois aumentou significativamente a recuperação do NH_4^+ no sistema solo-planta (artigo I), a eficiência de uso do N (EAN e RAN) e a produtividade de grãos de milho e trigo (artigo II). A importância agrônoma da injeção comparada à aplicação dos dejetos em superfície é expressa pela maior exportação de N pelos grãos, enquanto a ambiental pela maior retenção do N nos resíduos culturais (palha), reduzindo o potencial de perdas do nutriente para o ambiente. No artigo I os resultados indicaram que, em relação à aplicação superficial a injeção dos DLS no solo aumentou a recuperação do NH_4^+ aplicado com os DLS em $17,4 \text{ kg ha}^{-1}$ no primeiro cultivo de milho (2011) e em $9,1 \text{ kg ha}^{-1}$ no segundo (2012). No trigo, houve interação significativa entre o modo de aplicação dos DLS e o uso de inibidor de nitrificação, com a injeção tendo efeito significativo sobre a recuperação do NH_4^+ aplicado com os DLS apenas quando combinada com a DCD. No artigo II, a injeção subsuperficial dos DLS no solo aumentou o acúmulo de N total em 23% ($35,5 \text{ kg ha}^{-1}$) no milho e em 12% ($13,3 \text{ kg ha}^{-1}$) no trigo. O aumento na eficiência de uso do N dos dejetos pelas plantas (EAN e RAN) e na produtividade de grãos de milho e trigo apresentados no artigo II confirmam os benefícios da injeção dos DLS no solo. No milho a injeção aumentou em $9,2 \text{ kg grão kg}^{-1} \text{ N}$ a EAN, em 22,3% a RAN e em $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ a produtividade de grãos, em relação à aplicação superficial. No trigo o aumento foi menor, de $2,1 \text{ kg grão kg}^{-1} \text{ N}$ na EAN, 9% a RAN e de $0,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ na produtividade de grãos.

Essa diferença, em favor da injeção, pode ser explicada por três razões principais, que merecem ser investigadas em trabalhos futuros, variando as condições de solo e clima. O efeito da injeção pode ser atribuído principalmente a redução da volatilização de NH_3 (Nyord et al., 2012; Aita et al., 2014), a maior imobilização do NH_4^+ no solo (Sørensen; Amato, 2002) e por localizar o NH_4^+ dos dejetos na camada de solo mais próxima da zona de crescimento das raízes (Schroder et al., 2015). Assim a maior quantidade de N mineral no solo melhora o fornecimento desse nutriente às culturas. É importante salientar que esse melhor desempenho agrônomo apresentado pelas gramíneas quando os DLS foram injetados no solo precisa também ser comparado do ponto de vista econômico, já que há o custo adicional de aquisição da máquina para injetar os dejetos, aliado ao custo relativo ao aumento da demanda de energia (combustível) para injetar os dejetos no solo. Além disso, é preciso analisar como a prática da injeção dos DLS no solo pode impactar aspectos ambientais, tais

como: emissão de gases poluentes em função do aumento no consumo de combustível, redução de mau cheiro e transferência de poluentes (microrganismos fecais, carbono e nutrientes) para os mananciais via escoamento superficial.

Quanto à eficiência do inibidor de nitrificação DCD, quando aplicado juntamente com os DLS, os resultados foram inconsistentes entre os anos e cultivos, mostrando serem dependentes das condições ambientais do local, principalmente do regime de chuvas e da temperatura após sua aplicação no solo. Outros trabalhos reportam que a resposta das culturas à aplicação de inibidores de nitrificação associados a dejetos de suínos pode variar em função das características de solo, condições ambientais do local (Keeney et al., 1980; Shepherd et al., 2012; Federolf et al., 2016) e do modo de aplicação dos dejetos no solo (McCormick et al., 1984; Schimitt et al., 1995). A partir disso, fica clara a necessidade de intensificar os estudos que ajudem a elucidar a eficiência de inibidores de nitrificação, particularmente da DCD, em função das características de solo, condições de clima e do modo de aplicação dos dejetos suínos, e seu impacto sobre o desempenho das culturas agrícolas.

O uso de DCD não afetou significativamente a recuperação de NH_4^+ dos DLS no milho/2011, no entanto, dobrou (de 21 kg ha^{-1} sem vs. 45 kg ha^{-1} com DCD) a recuperação no milho/2012 (Artigo I). Essa variação foi atribuída principalmente às diferenças no regime de precipitação pluviométrica entre os dois anos. No ano de 2011 o volume de precipitação foi menor que em 2012. Portanto, a DCD parece ser mais eficiente em condições de elevada umidade que favoreçam a lixiviação de NO_3^- , comparado com anos mais secos e/ou com irrigação controlada, quando o potencial de lixiviação de NO_3^- é menor. Frye et al. (1989) confirmam que a eficiência dos inibidores de nitrificação é melhor em condições climáticas que favorecem a lixiviação de NO_3^- . Os resultados apresentados no artigo II também mostram pouco ou nenhum efeito da DCD sobre a eficiência de uso do N (EAN e RAN) e na produtividade das culturas avaliadas. A exceção foi no trigo cultivado no inverno de 2013, quando a DCD aumentou a produtividade e a eficiência de uso de N da cultura. Nessa situação, as temperaturas médias menores que a normal dos últimos 30 anos pode ter reduzido a velocidade de degradação da DCD no solo, preservando assim a sua eficiência em melhorar o fornecimento de N às plantas (Kim et al. 2012; Kelliher et al. 2014). Em função dos resultados observados no presente estudo, o uso de DCD em mistura com DLS não deve ser recomendado de modo generalizado sem antes entender o seu comportamento em função das características de solo e das condições climáticas após sua aplicação no solo.

Ainda sobre a DCD, acredita-se que as situações em que não houve resposta das culturas a sua aplicação também possa ter relação com a dose de N adicionada ao solo com os

DLS (Cookson; Conforth, 2002). Deste modo, é provável que mesmo com as perdas de N por volatilização de NH_3 , emissão de N_2O e por lixiviação de NO_3^- tenha sobrado no solo N suficiente para suprir a demanda das culturas. A partir disso, evidencia-se a necessidade de mais estudos avaliando o efeito da DCD na eficiência de uso do N e na produtividade das culturas, aplicando-se doses menores de N via DLS.

6 CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos resultados obtidos nos dois experimentos que compõe o presente trabalho conclui-se que:

1. A injeção dos dejetos líquidos de suínos em plantio direto aumenta a eficiência de uso do N, a produtividade e a recuperação do N-NH_4^+ dos dejetos por gramíneas cultivadas em plantio direto em comparação à aplicação superficial.
2. Os efeitos da dicianodiamida aplicada com dejetos líquidos de suínos na eficiência de uso do N por gramíneas são dependentes de condições climáticas como temperatura e precipitação pluviométrica após a sua aplicação no solo.
3. A injeção dos dejetos líquidos de suínos e a dicianodiamida tem efeito complementar no aumento da retenção do N-NH_4^+ aplicado com os dejetos no sistema solo-planta.
4. Há necessidade de mais estudos avaliando a viabilidade econômica da injeção mecânica dos DLS, associada ou não ao uso do inibidor de nitrificação dicianodiamida. Além disso, outros modos de aplicação (ex: aplicação em faixas) e inibidores de nitrificação alternativos (ex: N-bound) precisam ser avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABALOS, D. et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 189, p. 136-144, 2014.
- ABIPECS. Associação Brasileira da Indústria Produtora e Exportadora de Carne Suína. Disponível em: <<http://www.abipecs.org.br>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2015.
- AITA, C. et al. Injection of DCD-treated pig slurry reduced NH₃ volatilization without enhancing soil N₂O emissions from no-till corn in southern Brazil. **Journal Environmental Quality**, v. 43, p. 789-800, 2014.
- BAGGS, E. M. Soil microbial sources of nitrous oxide: recent advances in knowledge, emerging challenges and future direction. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 3, p. 321-327, 2011.
- CARNEIRO, J. P.; COUTINHO, J.; TRINDADE, H. Nitrate leaching from a maize×oats double-cropping forage system fertilized with organic residues under Mediterranean conditions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 160, p. 29-39, 2012.
- CELA, S.; SANTIVERI, F.; LLOVERAS, J. Residual effects of pig slurry and mineral nitrogen fertilizer on irrigated wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 34, p. 257-262, 2011.
- CHANTIGNY, M. H. et al. Evidencing overwinter loss of residual organic and clay-fixed nitrogen from spring-applied, ¹⁵N-labelled pig slurry. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 94, p. 1-8, 2014.
- COOKSON, W. R.; CORNFORTH, I. S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield. **Soil Biology Biochemistry**, v. 34, p. 1461-1465, 2002.
- DELL, C. J.; MEISINGER, J. J.; BEEGLE, D. B. Subsurface application of manures slurries for conservation tillage and pasture soils and their impact on the nitrogen balance. **Journal Environmental Quality**, v. 40, p. 352-361, 2011.
- DELL, C. J. et al. Low-Disturbance manure incorporation effects on ammonia and nitrate loss. **Journal Environmental Quality**, v. 41, p. 928-937, 2012.
- FEDEROLF, C-P. et al. Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany. **European Journal of Agronomy**, v. 75, p. 130-138, 2016.
- GIACOMINI, S. J. et al. Aproveitamento pelo milho do nitrogênio amoniacal de dejetos líquidos de suínos em plantio direto e preparo reduzido do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 761-768, 2009.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C. **Uso de dejetos animais em sistemas agrícolas**. In: ALVES, B. J. R. et al. *Manejo de sistemas agrícolas: Impacto no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa*. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas. Porto Alegre: Gênese, 2006, 215 p.

GONZATTO, R. **Injeção de dejetos de suínos no solo em plantio direto associada a um inibidor de nitrificação: efeito nas emissões de óxido nitroso e amônia**. Brasil, Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 83p. (Dissertação de Mestrado).

HALVORSON, A. D. et al. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers: potential role in nitrous oxide emission mitigation. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 715-722, 2014.

HOEKSTRA, N. J. et al. Slurry $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ recovery in herbage and soil: effects of application method and timing. **Plant and Soil**, v. 330, p. 357-368, 2010.

HUIJSMANS, J. F. M.; HOL, J. M. G.; VERMEULEN, G. D. Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 3669-3680, 2003.

JENSEN, L. S. et al. Turnover and fate of ^{15}N -labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 12, p. 23-35, 2000.

KEENEY, D. R. **Factors affecting the persistence and bioactivity of nitrification inhibitors**. In: **Nitrification Inhibitors—Potentials and Limitations**. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 33-46, 1980.

KELLIHER, F. M. et al. Effect of temperature on dicyandiamide (DCD) longevity in pastoral soils under field conditions. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 186, p. 201-204, 2014.

KIM, D. G. et al. Field studies assessing the effect of dicyandiamide (DCD) on N transformations, pasture yields, N_2O emissions and N-leaching in the Manawatu region. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 57, p. 271-293, 2014.

KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMETZ, R. L. R. Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. **Bioresource Technology**, v. 22, p. 5485-5489, 2009.

LARA CABEZAS, W. A. R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluída de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 363-376, 2000.

MAGUIRE, R. O. et al. Manure application technology in reduced tillage and forage systems: A review. **Journal Environmental Quality**, v. 40, p. 292-301, 2011.

MCCORMICK, R. A. et al. Increased N efficiency from nitrapyrin added to liquid swine manure used as a fertilizer for corn. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 1010-1014, 1984.

NYORD, T.; HANSEN, M. N.; BIRKMOSE, T. S. Ammonia volatilisation and crop yield following land application of solid-liquid separated, anaerobically digested, and soil injected animal slurry to winter wheat. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 160, p. 75-81, 2012.

OLIVEIRA, P. A. V. Produção e manejo de dejetos de suínos. Concórdia: Embrapa, 83 p. 2003.

ROCHETTE, P. et al. Ammonia volatilization and soil nitrogen dynamics following fall application of pig slurry on canola crop residues. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 81, p. 515-523, 2001.

SHEPHERD, M.; WYATT, J.; WELTEN, B. Effect of soil type and rainfall on dicyandiamide concentrations in drainage from lysimeters. **Soil Research**, v. 50, p. 67-75, 2012.

SCHMITT, M. A.; EVANS, S. D.; RANDALL, G. W. Effect of liquid swine manure application methods on soil nitrogen and corn grain yields. **Journal of Production Agriculture**, v. 8, p. 186-189, 1995.

SCHRÖDER, J. J. Revisiting the agronomic benefits of manure: a correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 253-261, 2005.

SCHRÖDER, J. J. et al. Maize yields benefit from injected manure positioned in bands. **European Journal of Agronomy**, v. 64, p. 29-36, 2015.

SINGH, S. N.; VERMA, A. The potential of nitrification inhibitors to manage the pollution effect of nitrogen fertilizers in agricultural and other soils: A review. **Environmental Practice**, v. 9, p. 266-279, 2007.

SØRENSEN, P.; AMATO, M. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil. **European Journal of Agronomy**, v. 16, p. 81-95, 2002.

SØRENSEN, P.; THOMSEN, I. K. Separation of pig slurry and plant utilization and loss of ¹⁵N-labeled slurry nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1644-1651, 2005.

SUBBARAO, G. V. et al. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems - Challenges and opportunities. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 25, p. 303-335, 2006.

THOMPSON, R. B.; MEISINGER, J. J. Management factors affecting ammonia volatilization from land-applied cattle slurry in the Mid-Atlantic USA. **Journal Environmental Quality**, v. 31, p. 1329-1338, 2002.

VELTHOF, G. L.; MOSQUERA, J. The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 140, p. 298-308, 2011.

WEBB, J. et al. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response - A review. *Agric. **Agriculture, Ecosystems and Environment***, v. 137, p. 39-46, 2010.

YAGÜE, M. R.; QUÍLEZ, D. Direct and residual response of wheat to swine slurry application method. ***Nutrient Cycling in Agroecosystems Journal***, v. 86, p. 161-174, 2010.

ZHANG, Y. et al. Nitrous oxide emissions from a maize field during two consecutive growing seasons in the North China Plain. ***Journal of Environmental Sciences***, v. 24, p. 160-168, 2012.