

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

**PREDIÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO
PELO MÉTODO DIRECT STEAM DISTILLATION
(DSD) EM SOLOS APTOS AO CULTIVO DE ARROZ
IRRIGADO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gerson Laerson Drescher

Santa Maria, RS, Brasil

2015

PREDIÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO PELO MÉTODO DIRECT STEAM DISTILLATION (DSD) EM SOLOS APTOS AO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

Gerson Laerson Drescher

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Professor Leandro Souza da Silva

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PREDIÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO PELO MÉTODO
DIRECT STEAM DISTILLATION (DSD) EM SOLOS APTOS AO
CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO**

elaborada por
Gerson Laerson Drescher

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:



Leandro Souza da Silva (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Sandro José Giacomini (UFSM)



Walkyria Bueno Scivittaro (EMBRAPA)

Santa Maria, 25 de fevereiro de 2015.

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

Drescher, Gerson Laerson
PREDIÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO PELO MÉTODO
DIRECT STEAM DISTILLATION (DSD) EM SOLOS APTOS AO
CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO / Gerson Laerson Drescher.-
2015.
72 p. ; 30cm

Orientador: Leandro Souza da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2015

1. Matéria Orgânica 2. Adubação Nitrogenada 3. Análise
de Solo I. Silva, Leandro Souza da II. Título.

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais Aníbal e Reni Drescher, por todo amor e carinho, pelos ensinamentos que formaram os pilares da minha história e pelos esforços dispendidos para proporcionar uma boa educação aos seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por iluminar o meu caminho e conceder-me perseverança e força nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Solos e, em especial, ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pelo acesso ao conhecimento e pela oportunidade de realização deste trabalho.

Às instituições de fomento à pesquisa, CNPq, CAPES e IPNI-Brasil pelo auxílio financeiro e a concessão das bolsas de estudos aos alunos de graduação e pós-graduação.

Ao professor Leandro Souza da Silva, pela amizade, apoio, orientação, aprendizado e confiança depositados em mim ao longo destes anos de parceria e trabalho, iniciados na graduação e reforçados durante o mestrado.

Aos professores do PPGCS pela amizade, ensinamentos e convívio.

Aos professores Sandro Giacomini e Celso Aita pelo empréstimo dos equipamentos para as análises das amostras.

Ao professor Rogério Oliveira de Sousa (UFPel) e ao pesquisador Elio Marcolin (IRGA), pelo auxílio no momento da coleta dos solos da Região Sul e Litoral Norte, respectivamente.

Aos funcionários do Departamento de Solos e do PPGCS, pelo auxílio e amizade.

Aos alunos de iniciação científica Natália Tobin Aita, Laila Garcia Marques, Rafael Busanello, Alexssandro de Freitas de Moraes, Julia Guimarães Bevilaqua e Adrielle Tassinari pela amizade, ajuda e empenho na realização das atividades experimentais.

Aos colegas da pós-graduação e do Laboratório de Análises Físico-Química e Microbiológica de Solo, Água e Solutos da UFSM, pelo convívio, amizade, momentos de descontração e apoio para a execução deste trabalho.

Ao meu cunhado Jorge Jequis e ao colega Eduardo Müller pelo auxílio nas coletas de solo.

À minha família, em especial aos meus pais, Aníbal e Reni, minhas irmãs, Marta e Márcia, pela educação, incentivo, amizade, apoio e compreensão e por todas as oportunidades, principalmente as de estudo e formação.

À minha namorada Jussara, por todo amor, carinho amizade e compreensão, principalmente na etapa final da execução deste trabalho.

À todos que não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

Ayrton Senna

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

PREDIÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO PELO MÉTODO DIRECT STEAM DISTILLATION (DSD) EM SOLOS APTOS AO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

AUTOR: GERSON LAERSON DRESCHER
ORIENTADOR: LEANDRO SOUZA DA SILVA
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de fevereiro de 2015.

O manejo da adubação nitrogenada nos estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) é realizado por meio de tabelas de interpretação do teor de matéria orgânica do solo (MOS), a partir do qual se obtêm as faixas de interpretação da disponibilidade de nitrogênio (N) e, conseqüentemente, as doses de N. No entanto, a produtividade do arroz irrigado por inundação é muito variável com o teor de MOS, sendo obtidos tanto baixos como elevados rendimentos relativos da cultura, independente do teor de MOS ou da adubação nitrogenada aplicada. Métodos de análise do solo que estimam frações lábeis de N orgânico, prontamente mineralizáveis e que podem ser disponibilizadas durante o ciclo da cultura, têm potencial para auxiliar na obtenção de uma melhor correlação entre o valor da análise do solo e a produtividade da cultura. Diante disso, o presente estudo visa avaliar a capacidade do teor de N alcalino hidrolisável, extraído pelo método de análise Direct Steam Distillation (DSD), em prever a mineralização de N em diferentes solos aptos ao cultivo de arroz irrigado do RS. Foram coletadas 32 amostras de solo na camada de 0 - 20 cm, abrangendo as cinco regiões produtoras de arroz do RS, com diferenças na textura e teor de MOS. Posteriormente, foi utilizado o método DSD para obter o índice de N mineralizável nos solos. Um experimento foi conduzido em laboratório para determinar a mineralização de N em incubação anaeróbica e outro experimento foi realizado em casa de vegetação, para determinar o teor e o acúmulo de N pelas plantas de arroz irrigado. Avaliou-se o coeficiente de correlação (r) linear de Pearson ($P < 0,05$) entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica e o conteúdo de N acumulado pelas plantas de arroz com a quantidade de N obtida pelo DSD, teores de MOS, N total e argila. O teor de N estimado pelo DSD, N mineralizado em incubação anaeróbica e o N acumulado pelas plantas apresentaram elevada amplitude, a qual esteve atrelada aos atributos dos solos. Os resultados encontrados apontam que a avaliação de uma fração mais lábil do N pelo método DSD melhora a estimativa da disponibilidade de N em comparação com métodos que avaliam o teor total de MOS, demonstrando que este índice tem potencial de ser utilizado para indicar a disponibilidade de N em solos sob cultivo de arroz irrigado por inundação no estado do RS. O teor de argila do solo influenciou a mineralização, disponibilidade e acúmulo de N pelas plantas de arroz, sugerindo a necessidade de se incluir este parâmetro do solo na calibração, interpretação e/ou recomendações do fertilizante nitrogenado para a cultura do arroz irrigado.

Palavras-chave: Matéria orgânica. Adubação nitrogenada. Análise de solo.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

PREDICTON OF NITROGEN MINERALIZATION BY DIRECT STEAM DISTILLATION (DSD) METHOD IN PADDY SOILS

AUTHOR: GERSON LAERSON DRESCHER

ADVISER: LEANDRO SOUZA DA SILVA

Defense Place and Date: Santa Maria, February 25th, 2015.

Nitrogen (N) fertilization management in the states of Rio Grande do Sul (RS) and Santa Catarina (SC), Brazil, is performed using interpretation tables of soil organic matter (SOM) in which we obtain the interpretation ranges of N availability and therefore N rates. However, the productivity of flooded rice is highly variable according to the SOM content, resulting low and high relative grain yields regardless of the SOM content or N fertilization. Soil analysis methods estimate the labile organic N, which is mineralizable and may be available during the crop cycle. Moreover, these methods have the potential to obtain a better correlation between the amount of soil analysis and crop productivity. Therefore, this study aims to evaluate the ability of alkaline hydrolyzable N content extracted by Direct Steam Distillation (DSD) method of analysis to predict N mineralization in paddy soils from RS state. We collected 32 soil samples (0-20 cm layer) in the five rice production areas of RS state, which presented some contrasting texture and SOM content. The DSD method was used to obtain the mineralizable N content in the soil samples. We carried out a laboratory experiment to determine the N mineralization in anaerobic incubation, and another greenhouse experiment to determine the content and the accumulation of N by rice plants. We evaluated the Pearson linear correlation coefficient (r) ($P < 0.05$) between the N content available after 28 days of anaerobic incubation and the N accumulation by rice plants with the N content obtained by DSD, SOM, total N and clay contents. The results of N estimated by DSD, N mineralized under anaerobic incubation and N accumulated by plants showed high amplitude, which was linked to the attributes of the soil samples. Results have shown that the evaluation of a more labile fraction of N by the DSD method improves the estimation of N availability when compared to the methods that assess the total SOM. This method has the potential to be used as indicator of the N availability in paddy soils in the RS state. The soil clay content influenced mineralization, availability and accumulation of N by rice plants, suggesting the necessity to include this soil parameter in the calibration, interpretation and/or recommendations of N fertilization for flooded rice.

Key words: Organic matter. Nitrogen fertilization. Soil analysis.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa da distribuição dos pontos de coleta de solo no estado do Rio Grande do Sul. Imagem Google Earth.....33
- Figura 2 - Imagem de alguns solos no momento de sua coleta.33
- Figura 3 - Preparo das amostras para incubação (a), disposição das amostras em incubadora BOD (b), retirada da amostra dos frascos de incubação para extração do N (c), amostras agitando (d), filtração da solução extraída com KCl (e), aparelho Skalar SAN ++ para leitura de N das amostras.36
- Figura 4 - Etapas da condução do experimento em casa de vegetação, preparo dos vasos (a), transplante das sementes pré-germinadas (b), aplicação da lâmina de água (c), visão geral do experimento no momento do desbaste das plântulas (d), visão geral do experimento no momento da leitura SPAD e coleta da parte aérea (e), leitura SPAD (f), altura das plantas de dois tratamentos no momento da coleta da parte aérea (g), coleta da parte aérea das plantas (h) e acondicionamento da amostra no momento da coleta para posterior secagem (i).37
- Figura 5 - Correlação entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) e a quantidade de N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas de arroz.....42
- Figura 6 - Correlação entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) e MOS determinada em laboratório de rotina (a); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (c); N total do solo determinado em analisador elementar (e) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (g). Correlação entre N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas e MOS determinado em laboratório de rotina (b); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (d); N total do solo determinado em analisador elementar (f) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (h). r = coeficiente de correlação linear de Pearson.44
- Figura 7 - Correlação entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) e MOS determinada em laboratório de rotina (a); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (c); N total do solo determinado em analisador elementar (e) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (g). Correlação entre N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas e MOS

determinado em laboratório de rotina (b); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (d); N total do solo determinado em analisador elementar (f) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (h). Solos com teor de MOS até 35 g kg^{-1} . r = coeficiente de correlação linear de Pearson.....45

Figura 8 - Correlação das leituras SPAD com teor N potencialmente mineralizável previsto pelo método DSD (a), produção de massa seca (b), teor de N no tecido (c) e N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas (d).50

Figura 9 - Relação do teor de argila com a MOS determinada em laboratório de rotina (a); MOS estimada a partir do teor de C determinado em analisador elementar (b), N total determinado em analisador elementar (c); N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (d); N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) (e) e N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas (f).51

Figura 10 - Relação do teor de argila com os teores de MOS estimada pelo teor de C determinado em analisador elementar, N estimado pelo DSD, N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N inc.) e N acumulado na parte aérea das plantas (N acum.).56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos e funções do nitrogênio.	17
Tabela 2 - Identificação, locais de coleta e informações dos solos coletados na camada de 0-20 cm nas diferentes regiões produtoras de arroz irrigado por inundação do estado do Rio Grande do Sul.	34
Tabela 3 - Características químicas e físicas dos solos coletados na profundidade de 0-20 cm nas diferentes regiões produtoras de arroz irrigado por inundação do estado do Rio Grande do Sul.	40
Tabela 4 - Produção de massa seca na parte aérea das plantas (P.A.), teor de N total no solo, teor de N no tecido das plantas, N mineralizado em incubação anaeróbica (N min.), N acumulado na parte aérea (N acum.), relação entre teor de N total do solo e N mineralizado e relação entre N total do solo (Nm/Nt) e N acumulado na parte aérea (Na/Nt).	54

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Valores N acumulado na parte aérea das plantas de arroz, N mineral (N-NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻) ao longo de 77 dias de incubação anaeróbia e correlação linear de Pearson (r).....	72
--	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Importância do nitrogênio e sua relação com a matéria orgânica do solo e a cultura do arroz irrigado	17
2.2	Correlação entre teor de MOS e produtividade de arroz	19
2.3	Mineralização de N em solos alagados.....	22
2.4	Fatores que afetam a dinâmica da matéria orgânica do solo	23
2.5	Predição da mineralização de N e sua disponibilidade para as culturas a partir da análise de solo	25
3.	HIPÓTESES	30
4.	OBJETIVOS	31
4.1	Objetivos gerais.....	31
4.2	Objetivos específicos	31
5.	MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1	Avaliação do N extraído pelo método DSD.....	35
5.2	Avaliação da mineralização do N em condições anaeróbicas	35
5.3	Cultivo do arroz irrigado e avaliação do teor de matéria seca e N acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado	36
5.4	Análise estatística e interpretação.....	38
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1	Características gerais dos solos estudados	39
6.2	Estimativa da disponibilidade de N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado ..	41
6.3	Relação da leitura SPAD com o N potencialmente disponível e parâmetros da planta	48
6.4	Influência do teor de argila do solo na disponibilidade de N	50
7.	CONCLUSÕES	58
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXOS	71

1. INTRODUÇÃO

O arroz irrigado é uma das culturas mais relevantes para o Estado do Rio Grande do Sul, sendo este responsável pela produção de cerca de 8 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 1,07 milhões de hectares na safra 2012/2013, soma que representou, aproximadamente, 68,7% da produção nacional (IRGA, 2013). A produtividade média da lavoura orizícola do RS vem aumentando a cada safra e está entre as maiores do Brasil (aproximadamente 7.500 kg ha⁻¹ na safra 2012/2013) (IRGA, 2013). Os sucessivos aumentos na produtividade da cultura do arroz irrigado estão atrelados à utilização racional dos fatores de produção, como o manejo da irrigação, controle de arroz vermelho, genética e adequado manejo da fertilidade do solo.

O manejo da fertilidade do solo visa à nutrição mineral das plantas, considerando o fornecimento de nutrientes pelo solo e por meio da adubação. Boa parte dos nutrientes que as plantas absorvem provém das reservas do solo e, deste modo, o desafio é conhecer a real capacidade do solo disponibilizar os nutrientes necessários às plantas, contribuindo para a minimização dos custos de adubação, melhorando o aproveitamento do recurso natural disponível.

Dos nutrientes essenciais às plantas, o nitrogênio (N) é um dos nutrientes requeridos em maior quantidade pelo arroz irrigado, junto com o potássio (K) (FAGERIA et al., 2003), sendo um dos mais importantes fatores que afetam a produção. A recomendação da adubação nitrogenada para as culturas nos estados do RS e SC é realizada com base no teor de matéria orgânica do solo (MOS), tanto para cultivos de sequeiro como para cultivos em solos alagados (CQFS-RS/SC, 2004). A MOS é considerada a mais importante fonte de N às culturas, que é disponibilizado, entre outros nutrientes, após mineralização pela atividade microbiana.

Nos solos cultivados com arroz irrigado por inundação, devido às condições de má drenagem e ao alagamento decorrente da irrigação, a dinâmica da MOS é diferenciada, tanto com relação aos produtos quanto à velocidade da decomposição. Este fato é decorrente de períodos de atividade biológica em condições aeróbicas e anaeróbicas, os quais afetam a mineralização da MOS e, conseqüentemente, a disponibilidade de N às plantas, dificultando a estimativa da dose de fertilizante nitrogenado a ser indicada para a cultura do arroz irrigado a partir do seu teor total. Também é importante considerar que a resposta da cultura à aplicação

de nitrogênio também está relacionada à fatores ambientais, como a radiação solar e temperatura, ao manejo da irrigação e potencial produtivo da cultivar, que influenciam a eficiência de uso do N. Diante disso, a produtividade do arroz irrigado é muito variável com o teor de MOS, sendo obtidos tanto baixos como elevados rendimentos relativos em solos que apresentam baixos ou altos teores de MOS, independente da adubação nitrogenada aplicada.

Diante dessa problemática, diversos estudos vêm sendo conduzidos visando desenvolver métodos de análise de solo e/ou parâmetros da planta mais eficientes em estimar a disponibilidade de N antes da implantação ou mesmo ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. No entanto, dos métodos e procedimentos desenvolvidos até o momento, nenhum conseguiu se adequar a rotina dos laboratórios ou possui uma adequada calibração de campo com o rendimento das culturas.

Recentemente, na busca de melhorar o manejo da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado no estado do Arkansas (EUA), Roberts et al. (2010, 2011) desenvolveram um protocolo de recomendação de adubação nitrogenada para arroz chamado Nitrogen Soil Test for Rice (N-STaR). Este protocolo está baseado na estimativa da quantidade de N que o solo pode fornecer durante o período de crescimento da cultura, utilizando-se um procedimento de destilação alcalina denominada em inglês de Direct Steam Distillation - DSD e, em função do resultado, ajustar doses para a adubação nitrogenada. Neste sentido, são fornecidas aos produtores as recomendações de doses de N correspondentes a três níveis de rendimento: econômico, ótimo e máximo, visando otimizar o uso do fertilizante na produção de arroz irrigado.

Considerando as limitações do uso do teor de MOS na estimativa da disponibilidade de N, o método DSD poderia ser utilizado em amostras de solos do RS e fazer parte do sistema de recomendação de N para o arroz irrigado neste Estado. Entretanto, o N-STaR foi inicialmente estabelecido para solos argilo-siltosos do Arkansas, sendo posteriormente calibrado para solos argilosos com diferente protocolo. Dessa forma, tendo em vista a grande amplitude de tipos de solos ocorrentes no RS, este estudo visa investigar a capacidade preditiva do método de análise DSD e auxiliar no entendimento da capacidade de mineralização do N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado, com diferenças quanto à textura e teor de matéria orgânica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do nitrogênio e sua relação com a matéria orgânica do solo e a cultura do arroz irrigado

O nitrogênio (N) possui papel fundamental no metabolismo vegetal, participando diretamente na biossíntese de proteínas e clorofilas (ANDRADE et al., 2003). O N faz parte dos aminoácidos que constituem as proteínas, as quais podem ser definidas como a base física da vida, atuando nos vegetais desde a etapa de absorção dos minerais pelas raízes ou folhas até a fotossíntese ou a respiração (MALAVOLTA et al., 2002). Está presente em cada etapa da vida da planta, da germinação da semente ou brotação da estaca, até a maturação do fruto e senescência das folhas. Em todas as etapas do desenvolvimento das plantas, há participação de compostos nitrogenados: do NH_3 às mais complicadas enzimas, passando por hormônios a compostos do metabolismo secundário (MALAVOLTA; MORAES, 2007). Na Tabela 1, é possível observar os principais compostos e funções do N nas plantas.

Tabela 1 - Principais compostos e funções do nitrogênio.

Composto	Função
Aminoácidos	Parte das proteínas
Aminas	Entrada do N reduzido
Ureídeos	Transporte
Poliaminas	Fonte endógena de NH_3
Proteínas	Reserva, enzimas
Ácido indolilacético	Hormônio
Leghemoglobina	Fixação biológica de nitrogênio (FBN)
Coenzimas	Absorção iônica, vários processos
Nucleotídeos	RNA e DNA
Pigmentos	Várias funções

Adaptado de Malavolta e Moraes (2007).

O N é o nutriente que tem recebido maior atenção da pesquisa em todo o mundo, por ser o nutriente que proporciona maiores respostas em produtividade nas culturas e devido à complexidade dos fatores que influenciam sua disponibilidade no solo e seu aproveitamento pelas plantas. Neste particular, vale ressaltar a ocorrência de grande variabilidade em sua eficiência agrônômica, ou seja, na capacidade de promover aumento de produtividade por unidade de nutriente adicionado ao solo (SCIVITTARO; MACHADO, 2004).

O N é encontrado na natureza nas formas de N molecular (N_2), de íons de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), que compõem a maior parte da fração mineral do nutriente no solo, ou ainda, incorporados a compostos orgânicos nitrogenados (DROZDOWICZ, 1997). As plantas superiores são capazes de absorver o N em diferentes formas, tais como N_2 , forma gasosa adquirida no processo de fixação biológica por espécies da família Fabaceae, aminoácidos, ureia, NH_4^+ e nas condições aeróbicas naturais como NO_3^- (MALAVOLTA et al., 1997), sendo que as principais formas assimiladas pelos vegetais são as formas amoniacal ou nítrica.

O ciclo do N está sujeito a uma complexa ordem de mecanismos regulatórios que envolvem fatores físico-químicos e biológicos e, principalmente, reações de oxirredução. A grande maioria das transformações do N é mediada metabolicamente por microrganismos autotróficos e heterotróficos, os quais são fortemente influenciados pelas condições físico-químicas prevalentes no ambiente (HERBERT, 1999). A reserva de N no solo é de natureza orgânica, estando sujeita às transformações que determinam as relações de equilíbrio entre o N orgânico e mineral e as necessidades de plantas e microrganismos (AITA et al., 2005).

O nitrogênio disponível do solo é praticamente todo proveniente da decomposição e mineralização da MOS, realizada por microrganismos que transformam o N orgânico nas formas amoniacal e nítrica (SCIVITTARO; MACHADO, 2004). Estas formas, por sua vez, são transportadas para o interior do citoplasma das células vegetais por meio de carregadores específicos, de baixa e de alta afinidade e com gasto de energia para ambos, para, posteriormente, serem assimiladas em aminoácidos e proteínas por via enzimática (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2001).

A mineralização mais rápida do N orgânico adicionado ao solo tem sido atribuída mais à labilidade e à recalcitrância do que especificamente à estrutura dos compostos (ZECH et al., 1997). Associados com o caráter lábil ou recalcitrante do N orgânico, as condições edáficas como textura, estrutura, temperatura, umidade, acidez/alcalinidade, fertilidade do solo interferem na cinética de mineralização do N orgânico (ZECH et al., 1997; GONÇALVES et al., 2001). Por este motivo, cada solo possui capacidade intrínseca de fornecer N às plantas a

partir da decomposição da MOS, em quantidades e taxas diferentes, que são dependentes do tipo de solo, da atividade microbiana e das condições ambientais (RHODEN et al., 2006a).

Em termos de resposta à adubação, o N é reconhecidamente o nutriente mais importante na cultura do arroz irrigado (SCIVITTARO; MACHADO, 2004). No entanto, o N também é o nutriente que apresenta as maiores taxas de perdas, podendo atingir até 80% do fertilizante aplicado (MARTHA JÚNIOR et al., 2004). Entre as principais razões para a ocorrência de perdas, estão os processos de volatilização, lixiviação, desnitrificação e erosão, baixas doses de aplicação e diminuição do teor de matéria orgânica em consequência dos cultivos sucessivos (FAGERIA, et al., 2007). Em decorrência da incidência destes processos, podem surgir limitações no desenvolvimento da cultura do arroz irrigado, os quais podem se refletir nos rendimentos da cultura (LORENSI, 2011).

No arroz, o N interfere principalmente no número de panículas por área, número de espiguetas por panículas, fertilidade das espiguetas e massa de grãos (FAGERIA et al., 2003). Estes autores expõem que, dentre tais componentes, o número de panículas apresenta maior coeficiente de correlação com a produtividade, podendo ele ser manipulado conforme a aplicação e eficiência de aproveitamento do nutriente. No trabalho de Barbosa Filho (2001) também se verifica o aumento no número de panículas como um dos efeitos mais importantes da utilização e aproveitamento da adubação nitrogenada, destacando, além disso, incrementos no número de grãos por panícula.

2.2 Correlação entre teor de MOS e produtividade de arroz

O teor de MOS é a base para as indicações de manejo da adubação nitrogenada nos estados do RS e de SC (CQFS-RS/SC, 2004), pelo fato de grande parte do N (cerca de 95%) estar no solo na forma orgânica (CAMARGO et al., 1999). Através da decomposição e mineralização da MOS, o N é liberado sob a forma mineral em diferentes velocidades, dependendo da sua recalcitrância e resistência ao ataque microbiano (CAMARGO et al., 1997). As tabelas de interpretação das doses de N para a adubação nitrogenada são baseadas em classes de teor de MOS, a partir da qual se obtêm as faixas de interpretação de disponibilidade de N (SOSBAI, 2014). No entanto, para uma mesma expectativa de produtividade de arroz, as doses de nitrogênio a serem adicionadas ao solo são muito próximas para as diferentes faixas de interpretação. Este fato pode ser explicado, em parte,

pela variação da produtividade de arroz independente da adubação mineral, podendo apresentar diferentes rendimentos relativos, tanto em solos com baixos como com altos teores de MOS, prejudicando a predição da recomendação de adubação nitrogenada (SCIVITTARO; MACHADO, 2004). Além disso, a produtividade e a resposta do arroz irrigado à adubação nitrogenada são muito dependentes do clima, principalmente com relação à temperatura e à radiação solar (VAHL, 1999), o que pode superestimar ou subestimar a resposta da cultura ao nutriente (RHODEN, 2005).

Esta limitação do teor de MOS para predição da adubação nitrogenada para o arroz irrigado pode também estar, teoricamente, relacionada aos ciclos de oxidação e redução que os solos sofrem para o cultivo de arroz irrigado (SOUSA, 2001), à presença de microrganismos fixadores de N que podem contribuir com fornecimento de N às plantas (HÜBNER, 2004), à composição da MOS em função dos diferentes sistemas de manejo do solo (SANTOS, 2003), ao tipo de população microbiana presente nestes ambientes e sua capacidade de decompor a MOS (VAZOLLER et al., 2008), entre outros, influenciando a real contribuição da MOS na quantidade de N mineral acessada pelas plantas durante o cultivo do arroz irrigado por inundação.

Dessa forma, a MOS perde a capacidade de associação com o teor de N absorvido pelas plantas ou com o rendimento relativo do arroz irrigado, diferentemente do que ocorre em solos de sequeiro (RHODEN et al., 2006b). Em função disso, diversos são os resultados encontrados na literatura sobre a relação da MOS, N mineralizado e resposta da cultura do arroz à adubação nitrogenada. Cassman et al. (1996) observaram que não houve correlação entre os teores de C orgânico, N total do solo e o N absorvido por plantas de arroz irrigado. Da mesma forma, Zhu et al. (1984) relataram correlação não significativa entre o N absorvido por plantas de arroz irrigado e o teor de N total do solo. No entanto, Dolmat et al. (1980) encontraram significativa, mas baixa, correlação entre o teor de N total do solo e a produção de grãos de arroz irrigado. Por sua vez, Pöttker e Tedesco (1979) e Li et al. (2003), avaliando a mineralização anaeróbia do N, encontraram correlação significativa entre o teor de C orgânico do solo e o N mineralizado pelo solo. No entanto, esse fato não necessariamente se reflete em N absorvido pelas plantas neste ambiente.

Como todos os processos que ocorrem no solo após o alagamento são dinâmicos e interligados, a avaliação e quantificação do nitrogênio no solo disponível às plantas são muito complexas e difíceis para a cultura do arroz (FAGERIA; STONE, 2003). O mesmo fato é observado no estabelecimento da probabilidade de resposta da cultura à aplicação de fertilizantes nitrogenados, o que explica em parte, os resultados de pesquisa com aplicação de

N para o arroz, que são muito variáveis e não permitem conclusões definitivas, ou mesmo satisfatórias, para recomendar precisamente as quantidades de N para a cultura (SILVA et al., 2007).

Nesse sentido, algumas alternativas têm sido apontadas para aprimorar o manejo da adubação nitrogenada, como a avaliação de parâmetros da planta, dentre as quais se pode salientar o estabelecimento do estado nutricional adequado (teor de N no tecido foliar) das plantas (SILVA et al., 2007), a avaliação do teor de clorofila das folhas, por meio de leituras SPAD (PENG et al., 1993; SILVA et al., 2008, POCOJESKI et al., 2012), cartela de cores (IRRI, 1996; POCOJESKI et al., 2012), que visam determinar o estado nutricional da cultura para avaliar a necessidade de uma eventual complementação com adubação. No entanto, ao avaliar a diagnose foliar, Scivittaro et al. (2005) e Silva et al. (2007) encontraram falta de correlação entre os índices de clorofila da fase vegetativa e a resposta das plantas em produtividade de grãos de arroz. Silva et al. (2008), por sua vez, verificaram que as leituras do clorofilômetro têm relação direta com o teor de N nas folhas, produção de matéria seca e N acumulado pela parte aérea das plantas de arroz irrigado. Entretanto, salientam que maiores leituras do clorofilômetro não se refletem diretamente em maior produtividade de grãos, sendo o valor de 36 unidades SPAD estimado como leitura crítica para a maior produtividade de arroz no estudo.

Em experimento com doses de N, Pcojeski et al. (2012) verificaram correlação significativa entre as leituras do clorofilômetro e o teor de N nas últimas folhas das plantas de arroz irrigado, independente da época de avaliação. No entanto, com a produtividade de grãos, houve correlação significativa somente para o estágio do florescimento, não havendo correlação para os quatro estágios avaliados antes do florescimento. Neste aspecto, os autores atribuem esse comportamento ao fato de que a avaliação do clorofilômetro em uma única folha possa não expressar o estado nutricional de toda a planta e de que o fator diluição, provocado pela diferente produção da matéria seca dos cultivares, possa influenciar na obtenção dos valores do clorofilômetro, não se correlacionando com a produtividade de grãos. Nesse sentido, sugerem incluir na avaliação outros parâmetros, como a produção de matéria verde ou seca das plantas.

Assim como ocorre com a determinação do N disponível no solo, o estabelecimento de doses de N a aplicar a partir do diagnóstico do estado nutricional da planta também é uma etapa complexa, pois é influenciada por uma série de fatores, como estágio de desenvolvimento da cultura, tipo e quantidade de resíduos vegetais na lavoura, tipo de preparo do solo, condições climáticas, genótipo utilizado e teto de produtividade a ser alcançado

(ARGENTA et al. 2003). Além destes, o tempo requerido para o diagnóstico, interpretação e aplicação da dose de N necessária pode não coincidir com o estágio fisiológico mais responsivo da cultura. De qualquer forma, os sistemas de recomendação podem se basear na análise de solo antes do cultivo para uma recomendação preliminar da dose de N e, posteriormente, de uma avaliação da planta para auxiliar na interpretação do estado nutricional e, se possível, fazer ajustes da recomendação em função das condições que ocorrem durante o ciclo da cultura. Nesse contexto, a análise de solo deve ser capaz de estimar adequadamente a capacidade de mineralização de N no solo ou, pelo menos, estar correlacionada com esta.

2.3 Mineralização de N em solos alagados

Em solos alagados, a decomposição anaeróbica da MOS ocorre de forma mais lenta do que em solos drenados porque um grupo menor e menos eficiente de bactérias realiza essa função nessas condições (VAHL, 1999). Em consequência do alagamento, o suprimento de O_2 para o solo se torna bastante lento devido à baixa taxa de difusão deste gás na água (cerca de 10.000 vezes menor do que no ar), provocando uma mudança da microbiota do solo que passa a ser predominantemente anaeróbia facultativa e obrigatória (SOUSA et al., 2009). Diferente da respiração aeróbica, para estes microrganismos, a decomposição da matéria orgânica se dá por respiração anaeróbica e fermentação, que ocorre de forma mais lenta do que a decomposição aeróbica; o receptor de elétrons deixa de ser o O_2 e os produtos finais da decomposição da matéria orgânica também são distintos em solos bem drenados e em solos alagados. Os principais compostos oxidados do solo utilizados pelos microrganismos anaeróbios são o nitrato, óxidos de manganês, óxidos de ferro e sulfatos, entre outros, que são reduzidos a N_2 , Mn^{+2} , Fe^{+2} e sulfetos, respectivamente (BARTLETT; JAMES, 1993).

Os microrganismos anaeróbios também podem utilizar como receptor final de elétrons compostos orgânicos do solo, que são produtos orgânicos intermediários das rotas metabólicas, no processo denominado de fermentação. Este tipo de metabolismo não envolve o ciclo de Krebs e nem a cadeia respiratória, sendo muito pouco eficiente energeticamente (AITA et al., 2005). Também transforma compostos orgânicos complexos em compostos orgânicos mais simples, tais como ácidos orgânicos, álcoois e mercaptanos, entre outros (SOUSA et al., 2000). Os microrganismos fermentadores realizam a oxidação incompleta de

açúcares e, desta forma, grande parte da energia permanece nos produtos finais da fermentação, o que explica a baixa eficiência metabólica dos microrganismos fermentadores (RHODEN, 2005).

A ausência de O_2 interrompe o processo de nitrificação, favorecendo o acúmulo de NH_4^+ no ambiente alagado, podendo ser retido no complexo de troca do solo, absorvido pelas plantas, imobilizado na biomassa e/ou sofrer nitrificação em regiões aeróbicas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). O excesso de oxigênio molecular que chega às raízes das plantas de arroz através dos tecidos denominados de aerênquimas, para a respiração radicular, pode ser liberado na rizosfera, podendo estimular a atividade de microrganismos nitrificadores, aumentando o processo de nitrificação no solo (HERBERT, 1999). Nestas zonas oxidadas, pode ocorrer a formação de NO_3^- , que por sua vez pode ser difundido para regiões de anaerobiose, sofrendo o processo de desnitrificação, no qual é reduzido pelos microrganismos anaeróbicos passando a óxido nitroso (N_2O) e N_2 voláteis, que são perdidos para a atmosfera (PONNAMPERUMA, 1972).

Outro aspecto a ser considerado é que, mesmo sendo a decomposição da MOS mais rápida em condições aeróbicas do que em condições anaeróbicas, o N inorgânico pode ser liberado e disponibilizado às culturas em maior quantidade e mais rapidamente em condições anaeróbicas pelo fato que existe uma menor imobilização do N na biomassa microbiana, relativamente ao N mineralizado, resultando em menor síntese de material celular e, conseqüentemente, menor crescimento microbiano (PONNAMPERUMA, 1972). Dessa forma, a quantidade de N que o solo pode fornecer à cultura depende da ação conjunta de todas as reações que governam a dinâmica do N, que por sua vez irá balizar a quantidade de fertilizante nitrogenado que deve ser adicionado ao solo para atender a necessidade da cultura.

2.4 Fatores que afetam a dinâmica da matéria orgânica do solo

Há diversos fatores que afetam a taxa de decomposição da MOS, principalmente quando sistemas naturais são convertidos para a agricultura, alterando de forma bastante agressiva as taxas de adição e de degradação da MO. Entretanto, existem mecanismos químicos e físicos que podem proteger a matéria orgânica da ação dos microrganismos decompositores, determinando que moléculas de mesma composição e complexidade sejam

diferentemente suscetíveis à decomposição (ROSA, 2010). Estes mecanismos são denominados de recalcitrância, interação química ou coloidal e proteção física ou inacessibilidade (CHRISTENSEN, 1996).

A recalcitrância molecular é definida como a resistência variável de uma molécula em ser decomposta, em função do seu tamanho, conformação molecular, presença de grupos funcionais, ou mesmo sua composição elementar (TISDALL; OADES, 1982). Compostos de menor recalcitrância são degradados seletivamente pelos microrganismos, aumentando a recalcitrância média do resíduo remanescente. Alguns autores consideram a recalcitrância insuficiente para explicar variações no tempo de permanência da matéria orgânica no solo, pois alguns estudos têm demonstrado que a estabilidade da MOS é mais dependente dos mecanismos de proteção física do que da recalcitrância intrínseca dos compostos orgânicos (SKJEMSTAD, 1993; LADD, et al., 1993).

Entre os minerais, a argila é mais ativa na formação de complexos organo-minerais, devido à sua carga e área superficial específica. Entre os compostos orgânicos, as substâncias húmicas e os polissacarídeos, com seus grupos funcionais carboxílicos e fenólicos (aromáticos), são os principais envolvidos nas interações organominerais (NEWMAN; HAYES, 1990). Essas interações são associações intermoleculares entre substâncias orgânicas e inorgânicas que alteram a taxa de degradação das moléculas orgânicas ou a síntese de novas moléculas (LADD et al., 1993; PILLON, 2000).

Os óxidos e os argilominerais são os principais minerais responsáveis pelas interações com a MOS, considerando que as reações de superfície são as responsáveis pelas interações. Em trabalho realizado por Roscoe et al. (2001), foi verificado que aproximadamente 90% do carbono orgânico total (COT) estava acumulado nas frações silte + argila em um Latossolo do Cerrado brasileiro, demonstrando a importância destas frações na estabilização da MOS. A mineralogia dominante é outro importante atributo na estabilização química da MOS, pois são encontradas na literatura diferenças na associação organo-mineral em solos com mineralogia distinta (PARFITT et al., 1997; WISEMAN e PÜTTMANN, 2005).

O mecanismo de estabilização química é influenciado diretamente pelo grupo de minerais do solo que podem ter carga variável, no caso, os óxidos de ferro e alumínio e caulinita (grupos funcionais hidroxil (OH) e grupos aluminol (Al-OH) respectivamente), cuja carga líquida de superfície varia com o pH do solo, a qual diminui quando o pH aumenta. Já os minerais de carga permanente, apresentam sua carga em função do grau da substituição isomórfica nas lâminas octaedral e tetraedral dos minerais (SPOSITO, 1989). Deste modo, para que ocorra interação química, dois atributos do solo são de grande relevância:

distribuição do tamanho de partículas e mineralogia dominante. Considerando que ambos atributos são pouco afetados pelo manejo, pode-se dizer que a quantidade de matéria orgânica quimicamente estabilizada é pouco dependente do sistema de manejo utilizado no solo (DUXBURY et al., 1989).

A acumulação de MOS devido à proteção física é decorrente da formação de uma barreira entre a MOS e microrganismos, enzimas e seus substratos pelos agregados do solo. A oclusão da MOS no interior dos agregados possibilita que esta fique protegida fisicamente. Esta proteção, por sua vez, está relacionada com a formação e estabilização dos agregados, seja pela encapsulação no interior dos macro e microagregados ou em microporos inacessíveis (TISDALL; OADES, 1982; GOLCHIN, 1994). A proteção física tem grande importância no controle da decomposição e mineralização da MOS. Uma parte considerável do espaço poroso do solo possui diâmetro muito pequeno, o que impede a movimentação dos microrganismos decompositores, dificultando o seu acesso à MOS protegida (ROSA, 2010).

Deste modo, estes fatores de estabilização da MOS podem estar associados com a falta de correlação da MOS e a resposta desta à adubação nitrogenada e produtividade na cultura do arroz irrigado no RS, conforme abordado anteriormente, uma vez que há uma grande diversidade de mineralogia e textura nos solos cultivados com arroz irrigado por alagamento no estado do RS.

2.5 Predição da mineralização de N e sua disponibilidade para as culturas a partir da análise de solo

Diante da problemática da falta de correlação entre o teor de MOS e a produtividade do arroz irrigado, estudos vêm sendo desenvolvidos visando desenvolver métodos e parâmetros de solo mais eficientes em estimar a disponibilidade de N e programar a adubação nitrogenada. Entre os métodos laboratoriais desenvolvidos para a predição da mineralização de N, estão os métodos biológicos (incubações aeróbicas e anaeróbicas) e as análises químicas. Ambos os métodos, químicos e biológicos, fornecem estimativas dos chamados “índices de disponibilidade de nitrogênio” (CANTARELLA, 2007). Os métodos de incubação de solo para a estimativa da mineralização de nitrogênio podem ser realizados em condições aeróbicas ou anaeróbicas, em períodos de curta ou longa duração (OLIVEIRA, 1989). Nestes casos, a mineralização do N refere-se às quantidades líquidas, pois não são contabilizados o

consumo e as perdas de nitrogênio por processos de desnitrificação, volatilização, imobilização, etc. (WANG et al., 2001).

O método original de incubação aeróbica de 30 semanas foi desenvolvido por Stanford e Smith (1972) e possui boa correlação com o N mineralizado em campo (CURTIN; McCALLUM, 2004); entretanto, é pouco prático para a adoção dos laboratórios. Neste sentido, foram desenvolvidos métodos de incubação anaeróbica de uma semana, que também tem apresentado correlações com o N mineralizado em condições controladas (KEENEY; BREMNER, 1966; DERSCH et al., 2003). No entanto, pesquisadores da Pensilvânia (FOX; PIEKIELEK, 1984) e de Minnesota (THICKE et al., 1993) não encontraram correlação entre incubação anaeróbica e disponibilidade de N para a cultura do milho.

Muitos métodos químicos têm sido avaliados para a estimativa da disponibilidade de nitrogênio do solo, utilizando como extratores soluções ácidas, alcalinas e salinas diluídas (CANTARELLA; RAIJ, 1986; OLIVEIRA, 1989; REICHMANN SOBRINHO, 1989), com alta, média ou baixa intensidade de extração (STANFORD, 1982; GIANELLO et al., 2000). Estes métodos são rápidos e, em alguns casos, tem apresentado boas correlações com o N disponível durante cultivos sob condições controladas de água e temperatura (GARCIA; DAVEREDE, 2007). Entretanto, esses métodos estão disponíveis a mais de 20 anos e nunca foram adotados em massa pelo fato de não apresentarem resultados de campo confiáveis (CURTIN; McCALLUM, 2004).

Os métodos de intensidade alta de extração são assim classificados porque removem grandes quantidades de N, as quais se correlacionam estreitamente ao N total. Os métodos de intensidade média ou intermediária não têm sido definidos por quaisquer quantidades de N extraídas, sendo apenas identificados por princípios de extração por hidrólise alcalina ou oxidação ácida. Por sua vez, os métodos de intensidade baixa de extração ou brandos extraem, supostamente, quantidades de N que podem ser derivadas do compartimento biologicamente ativo do solo (STANFORD, 1982), ou seja, são análises químicas que visam extrair frações de N mais lábeis da MOS, simulando a quantidade de N mineralizada durante um ciclo de cultivo (GARCIA; DAVEREDE, 2007).

Os teores de matéria orgânica e de N total do solo são exemplos de índices de disponibilidade de extração intensa (GIANELLO et al., 2000). Tem sido demonstrado repetidamente que o N total não é índice confiável de disponibilidade de nitrogênio para muitos solos (STANFORD, 1982). De acordo com Wang et al. (2001), o N total do solo representa um compartimento dezenas ou centenas de vezes maior que o compartimento do nitrogênio prontamente disponível para as plantas e a sua disponibilidade, por ser regida por

diversos fatores, seria demasiadamente simplificada pela medida do N total. Segundo Magdoff (1991), os teores de N total ou de variáveis que se correlacionam a ele não são adequados para prever a disponibilidade de nitrogênio para as plantas em muitos tipos de solos e condições de manejo.

Requisitos para um método de análise de N do solo ser bem sucedido incluem rapidez, eficiência e a capacidade de correlacionar-se à absorção de N e ao rendimento da cultura. Os métodos biológicos oferecem a maior capacidade preditiva para a estimativa de nitrogênio potencialmente mineralizável, mas são demorados e inconsistentes para a previsão de resposta da cultura (STEVENSON; COLE, 1999). Os métodos químicos oferecem uma alternativa atraente devido ao tempo de análise relativamente curto, uma elevada reprodutibilidade e correlação com estimativas biológicas de N potencialmente mineralizável. Contudo, infelizmente o interesse na abordagem química para um teste de N do solo tem sido limitada pela visão predominante de que nenhum método químico pode extrair com precisão formas de orgânicas de N-lábil (WANG et al., 2001).

A pesquisa com métodos químicos para a estimativa da disponibilidade de nitrogênio é contraditória, havendo sucessos e fracassos para um mesmo extrator (CANTARELLA, 1989). Segundo Cantarella e Raij (1986), embora seja pouco provável que métodos de incubação de solo de curta duração e métodos químicos forneçam estimativas seguras da disponibilidade de nitrogênio do solo devido a fatores climáticos pouco previsíveis, os mesmos podem ser úteis se calibrados para solos de uma região e se usados em conjunto com medidas das condições climáticas. Assim, um método químico pode tornar-se uma ferramenta útil para a recomendação de adubação nitrogenada, especialmente se for visto como parte de um sistema de recomendação e não como um componente único (CANTARELLA, 1989).

Mais recentemente, Khan et al. (2001) reacenderam a busca de um método químico que poderia prever com precisão a resposta das culturas ao N com o desenvolvimento da Análise de Nitrogênio do Solo de Illinois (em inglês Illinois Soil Nitrogen Test - ISN'T). Esse método foi desenvolvido para quantificar o N lábil de uma amostra de solo submetida à hidrólise alcalina, requerendo baixa tecnificação e sendo completado em um dia. Este método foi capaz de quantificar formas de N alcalino hidrolisáveis, principalmente sob a forma de açúcares aaminados (por exemplo, glucosamina) e aminoácidos (por exemplo, glutamina) (KWON et al., 2009; ROBERTS et al., 2009a), e prever quando o milho responderia à aplicação do fertilizante nitrogenado. O ISN'T é uma estimativa da fração de N que poderá mineralizar durante o ciclo da cultura; entretanto não pode prever a quantidade de N inorgânico imediatamente disponível em dado momento, uma vez que a taxa de mineralização

é dependente da atividade microbiana, que é influenciada por fatores como a umidade e temperatura (GARCIA; DAVEREDE, 2007).

Muitos produtores de Illinois já tem adotado o ISN'T e vários laboratórios comerciais estão oferecendo o serviço de análise (GARCIA; DAVEREDE, 2007). Williams et al. (2005) observaram forte correlação entre a dose ótima economicamente de N e o ISN'T no estado da Carolina do Norte. No entanto, nos demais estados dos Estados Unidos, o ISN'T não apresentou resultados tão bons como para Illinois. Os resultados promissores encontrados em Illinois geraram interesse em considerar o ISN'T como método de diagnóstico para a fertilização nitrogenada de milho na Argentina. As análises preliminares encontrados em Santa Fé geraram boas perspectivas para a utilização desse teste como método de diagnóstico para a fertilização nitrogenada (GARCIA; DAVEREDE, 2007).

Embora o ISN'T tenha se mostrado promissor para uso em amostras de solos convencionalmente amostradas e analisadas, surgiram críticas devido à alta variabilidade da amostra recebida pelos laboratórios, inconsistências com os resultados analíticos e tempo de análise (KLAPWYK; KETTERINGS, 2005; SPARGO et al., 2009). Várias modificações foram desenvolvidas para tentar resolver os problemas iniciais com o ISN'T, sendo que o trabalho realizado por Bushong et al. (2008) levou ao desenvolvimento de uma técnica de destilação direta a vapor como uma técnica alternativa, denominada em inglês de Direct Steam Distillation (DSD). A técnica DSD tem mostrado uma forte correlação com o método de análise ISN'T, reduzindo o tempo de análise e a variabilidade de resultados (ROBERTS et al., 2009a). Técnicas de destilação direta a vapor têm se mostrado como alternativas viáveis e promissoras ao ISN'T com correlações significativas encontradas entre DSD e ISN'T, bem como com a incubação anaeróbica (BUSHONG et al., 2008).

A correlação bem sucedida e calibração de um teste baseado no N do solo para o arroz irrigado produzido na metade-Sul dos EUA tem sido o foco de pesquisas durante muitos anos. A primeira tentativa foi realizada por Wilson et al., (1994) sendo incapaz de prever as necessidades de N para o arroz em um ambiente de campo, fato atribuído à limitações analíticas do método utilizado ou à profundidade de amostragem do solo.

Nesta mesma busca e com o desenvolvimento do DSD, pesquisadores da University of Arkansas desenvolveram o primeiro teste baseado no N do solo para arroz chamado de Nitrogen Soil Test for Rice (N-STaR) (ROBERTS et al., 2010, 2011), cujo objetivo é estimar a quantidade de N que o solo pode fornecer durante o período de crescimento (estimado por meio do teste DSD) e ajustar doses da adubação nitrogenada para maximizar produção de arroz irrigado. O trabalho desenvolvido por Roberts et al. (2011) foi bem sucedido no

desenvolvimento do método de destilação a vapor direto (BUSHONG et al, 2008; ROBERTS et al, 2009a), que está altamente correlacionado com a absorção de N total de arroz e o rendimento relativo da cultura. O sucesso no desenvolvimento de uma curva de calibração foi alcançado e resultou em um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,89$). Porém, para esse resultado ser alcançado, os solos tiveram de ser amostrados a uma profundidade de 45 cm, que aparece ser a profundidade de enraizamento eficaz do arroz cultivado em solos argilo-siltosos em Arkansas (ROBERTS et al., 2011).

Semelhante à pesquisa apresentada por Williams et al. (2007), onde os solos foram separados com base na classificação de drenagem, a capacidade de N-STaR de prever doses de N específicas do local está ligada à textura do solo. A influência da textura do solo sobre o N alcalino hidrolisável exige o desenvolvimento de diferentes curvas de calibração com base na textura do solo (ROBERTS et al., 2011). Diante dessa problemática, pesquisadores da University of Arkansas realizaram estudos e atualmente estão disponíveis aos produtores dois protocolos específicos (desde amostragem do solo até a recomendação da adubação nitrogenada), sendo um referente à produção de arroz em solos arenosos e argilo-siltosos e outro para a produção em solos argilosos. Deste modo, após a análise da amostra de solo no laboratório, um relatório é enviado para o solicitante contendo as recomendações de doses de nitrogênio segundo N-STaR. Também são fornecidas aos produtores as recomendações de taxas de N correspondentes a três níveis de rendimento: econômico, ótimo e máximo, uma vez que o N-STaR não é projetado para aumentar a produção de arroz, mas para aumentar a rentabilidade do produtor através de recomendações de doses específicas de N para cada situação.

Assim, na busca de métodos ou de outros parâmetros indicativos da disponibilidade de N no solo que estejam correlacionados com as exigências das culturas, visando as melhores respostas entre o fertilizante nitrogenado e a produção de grãos no Rio Grande do Sul, propõe-se estudar a capacidade do método DSD em estimar a disponibilidade de N em solos do RS utilizados para o cultivo de arroz irrigado. Caso o método apresente potencial, este poderá ser calibrado a campo e desenvolvidos protocolos específicos de recomendação da adubação nitrogenada.

3. HIPÓTESES

- A fração de N-lábil obtida pelo método DSD possui melhor correlação com o N disponível às plantas em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado do que o teor de MOS determinado pelo método atualmente empregado em laboratórios de rotina do Rio Grande do Sul, podendo ser utilizada como indicadora do N disponibilizado à cultura;
- Apesar da fração de N lábil obtida pelo método DSD possuir melhor correlação com o N disponível que o atual índice utilizado na recomendação do fertilizante nitrogenado, os resultados são influenciados pelo teor de argila da amostra, afetando a quantidade de N disponibilizada pelo solo e/ou absorvida pelas plantas.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivos gerais

O presente trabalho objetiva avaliar a capacidade de extração de formas de N alcalino hidrolisável do solo pelo método de análise Direct Steam Distillation (DSD) e realizar um prognóstico da capacidade de mineralização de N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado por inundação, com diferenças na textura e teor de matéria orgânica.

4.2 Objetivos específicos

- Avaliar a capacidade do extrator alcalino DSD em determinar frações lábeis da MOS em solos sob cultivo de arroz irrigado no estado do RS;
- Correlacionar a fração de N-lábil extraído pelo método DSD com o N mineralizado em incubação anaeróbica e o N acumulado pelas plantas de arroz, para determinar a eficiência do método de análise DSD em predizer a mineralização de N;
- Avaliar o efeito da textura do solo sobre a extração de formas N-lábil e o prognóstico da mineralização de N.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Os solos utilizados no presente estudo foram coletados em áreas representativas em termos de cultivo de arroz no estado do RS (Figura 1), apresentando amplitude em características químicas, físicas e mineralógicas, fatores que influenciam a capacidade de extração e predição da mineralização de N. Neste sentido, as coletas de solos abrangeram todas as regiões produtoras de arroz irrigado do estado de RS: Fronteira Oeste (seis amostras), Campanha (oito amostras), Depressão Central (12 amostras), Planície Costeira Interna (uma amostra), Planície Costeira Externa (duas amostras) e Zona Sul (três amostras). Foram coletadas 32 amostras de solo em 17 municípios, o que possibilitou uma boa amplitude em relação à textura, sendo estes solos pertencentes a seis diferentes ordens de solos: Chernossolo, Gleissolo, Planossolo, Plintossolo, Neossolo e Vertissolo, conforme classificação de Streck et al. (2008) (Tabela 2).

As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0 - 20 cm (Figura 2), conforme recomendação do Manual de Adubação e Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS RS/SC, 2004) para a cultura do arroz irrigado. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm. Após o preparo do solo, foi realizada a determinação dos parâmetros: MOS, pH em água, H + Al, teores de P, K, Ca, Mg e Al, conforme os métodos descritos em Tedesco et al. (1995). A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Embrapa 1997). Para a determinação dos teores de carbono e nitrogênio totais, foi retirada uma subamostra de cada um dos solos previamente secos e peneirados, a qual foi finamente moída em graal de ágata, para posterior análise em autoanalisador elementar (modelo FlashEA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Itália). O valor de C total foi convertido a teor de MOS por meio da equação $C_{total} \times 1,724$ (fator de van Bemmelen), sendo posteriormente denominado de MOS autoanalisador, para poder relacionar com os valores de MOS obtidos pelo método usado na rotina dos laboratórios de análises de solos (MOS rotina) no sistema de recomendação de N no RS e SC (CQFS RS/SC, 2004).



Figura 1 - Mapa da distribuição dos pontos de coleta de solo no estado do Rio Grande do Sul. Imagem Google Earth.

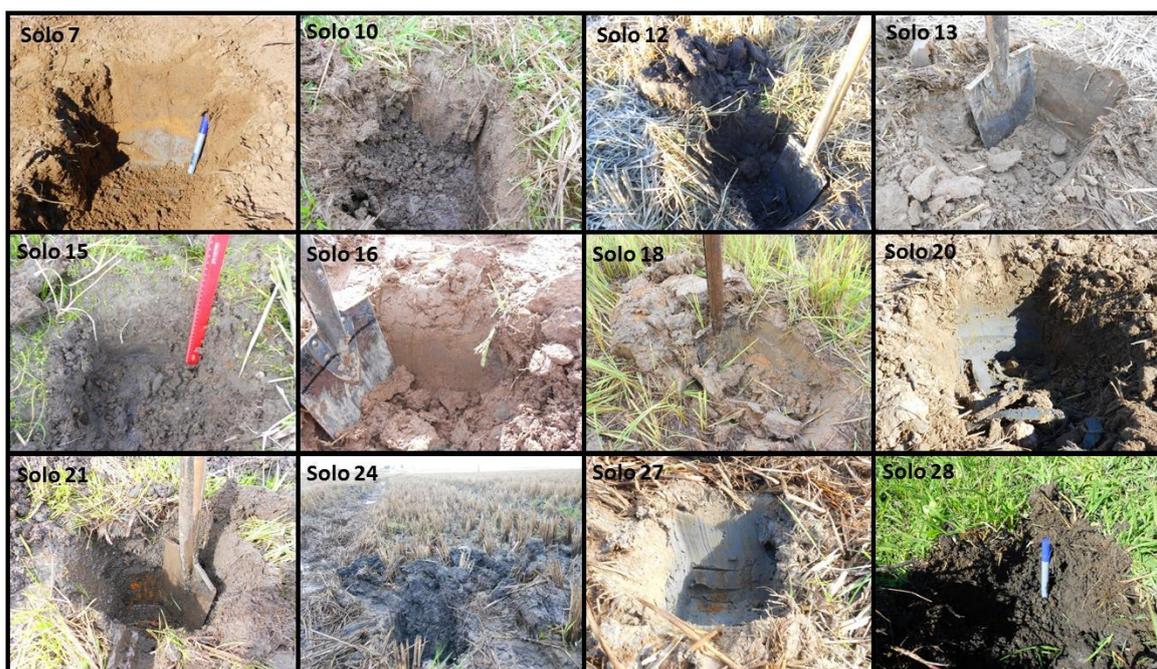


Figura 2 - Imagem de alguns solos no momento de sua coleta.

Tabela 2 - Identificação, locais de coleta e informações dos solos coletados na camada de 0-20 cm nas diferentes regiões produtoras de arroz irrigado por inundação do estado do Rio Grande do Sul.

Solo*	Local de Coleta	Classificação	Cultivo Anterior
1	Faxinal do Soturno	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
2	Rio Grande	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
3	Viamão	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
4	Paraíso do Sul	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
5	Pelotas	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
6	Cachoeira do Sul	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
7	Agudo	Planossolo Háptico Eutrófico	soja
8	São Vicente	Planossolo Háptico Eutrófico	soja
9	Viamão	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
10	Uruguaiana	Neossolo Regolítico Eutrófico	arroz
11	Santana do Livramento	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
12	Dom Pedrito	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
13	Dom Pedrito	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
14	Alegrete	Planossolo Háptico Eutrófico	pastagem
15	Bagé	Gleissolo Háptico Eutrófico	arroz
16	Caçapava do Sul	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
17	Rio Pardo	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
18	Paraíso do Sul	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
19	Dom Pedrito	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
20	Agudo	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
21	Alegrete	Plintossolo Argilúvico Eutrófico	arroz
22	Agudo	Planossolo Háptico Eutrófico	soja
23	Uruguaiana	Chernossolo Ebânico Carbonático	arroz
24	Uruguaiana	Vertissolo Ebânico Órtico	arroz
25	Santa Maria	Gleissolo Háptico Eutrófico	arroz
26	São Vicente	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
27	Cachoeira do Sul	Gleissolo Háptico Eutrófico	arroz
28	Rio Grande	Chernossolo Argilúvico Carbonático	pastagem
29	Agudo	Planossolo Háptico Eutrófico	arroz
30	Dom Pedrito	Vertissolo Ebânico Órtico	arroz
31	Uruguaiana	Vertissolo Ebânico Órtico	pastagem
32	Camaquã	Vertissolo Ebânico Órtico	arroz

* Organizados em ordem crescente com base no teor de argila.

5.1 Avaliação do N extraído pelo método DSD

A quantidade de N extraída pelo método DSD foi obtida conforme metodologia descrita por Bushong et al. (2008) e Roberts et al. (2009a). Para tanto, foi colocado 1 g de solo em um tubo de digestão, adicionado 10 mL de NaOH 10 mol L⁻¹ e realizada a destilação a vapor com solução indicadora de ácido bórico (H₃BO₃) (5 mL) em destilador semi-micro-Kjeldahl. Depois de 35 mL do destilado ser recolhido, a quantidade de N (N-NH₄ + açúcares hidrolisáveis) capturado na solução indicadora foi quantificada utilizando técnicas de titulação acidimétrica. Os tratamentos foram constituídos pelos diferentes tipos solos, analisados com quatro repetições.

5.2 Avaliação da mineralização do N em condições anaeróbicas

Para estimar o potencial de mineralização de N dos solos, foi realizado um experimento de incubação anaeróbia, no qual foram utilizados 5 g de solo, acondicionados em tubos de vidro com capacidade de 35 mL, sendo posteriormente adicionados 12,5 mL de água destilada, conforme metodologia proposta por Bundy e Meisinger (1994). Posteriormente, os tubos de vidro foram cobertos por filme plástico para evitar trocas gasosas com o ambiente externo, acondicionados em séries e armazenados em incubadora do tipo DBO a 40 °C (Figura 3). Os tratamentos foram compostos pelos diferentes solos na condição anaeróbica, com quatro repetições, sendo que cada tubo de vidro constituiu uma unidade experimental.

O teor de N mineral obtido pela análise prévia dos solos após extração com KCl 2 mol L⁻¹ foi considerado como tempo zero (antes da incubação). As demais avaliações do teor de N foram realizadas a cada sete dias durante quatro semanas, e posteriormente aos 42 e 77 dias após a instalação do experimento. Para a determinação do nitrogênio mineral, a amostra (solo + água) contida nos tubos de vidro foi colocada em um frasco snap-cap, onde foi adicionado 12,5 mL de KCl 4 mol L⁻¹, agitando-se a amostra por 1 hora em agitador horizontal, conforme proposto por Bundy e Meisinger (1994). Após a agitação, os frascos foram deixados para decantar durante 30 minutos. Posteriormente, foi retirada uma alíquota de 10 mL, a qual foi filtrada à 2 µm para posterior determinação do teor de nitrogênio mineral (N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) no aparelho Skalar SAN⁺⁺ (Figura 3).

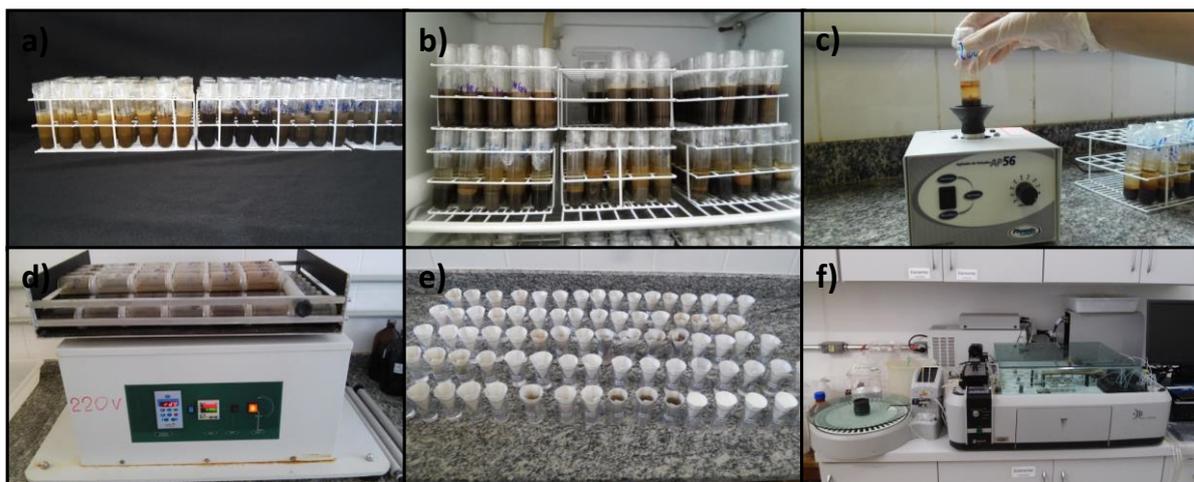


Figura 3 - Preparo das amostras para incubação (a), disposição das amostras em incubadora BOD (b), retirada da amostra dos frascos de incubação para extração do N (c), amostras agitando (d), filtração da solução extraída com KCl (e), aparelho Skalar SAN ++ para leitura de N das amostras.

5.3 Cultivo do arroz irrigado e avaliação do teor de matéria seca e N acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado

Para quantificar o N disponível às plantas de arroz, um experimento foi conduzido na casa de vegetação do Departamento de Solos da UFSM, onde foram montados vasos com capacidade de 3L, utilizando-se 3 kg dos mesmos solos descritos anteriormente. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento. Os tratamentos foram constituídos pelos diferentes solos de várzea do RS.

Inicialmente, sementes de arroz irrigado da cultivar Puitá Inta CL foram postas para pré-germinar. Posteriormente, no dia 23 de outubro de 2014 foi realizado o transplante de 10 plântulas em cada vaso. Após o estabelecimento das mesmas, foram mantidas apenas 7 plantas por vaso, selecionando-se as mais desenvolvidas (Figura 4). Dois dias após o transplante, foi aplicada uma lâmina de água de aproximadamente 1 cm, simulando o sistema pré-germinado (Figura 4), de modo que a mineralização da MOS ocorresse anaerobicamente como no experimento de incubação. Posteriormente, após o desenvolvimento das plantas, aumentou-se a lâmina de água para 6 cm.

Aos 42 dias após o transplante foram realizadas leituras para estimar o teor de clorofila (unidades SPAD), por meio de leitura do aparelho portátil clorofilômetro Minolta (modelo SPAD-502). Foi realizada uma leitura por planta, compondo 7 leituras por vaso e 28 por tratamento. As leituras foram realizadas na última folha completamente expandida na posição intermediária da folha (Figura 4).

No dia 08 de dezembro de 2014, após de 45 dias de cultivo, a parte aérea das plantas foi coletada (Figura 4) e seca em estufa a 65 °C até massa constante. Posteriormente realizou-se a pesagem do material seco para determinação da produção de matéria seca por vaso. Após a secagem, a parte aérea das plantas foi moída para determinação do teor de N total no tecido em autoanalisador elementar (modelo FlashEA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Itália). O N acumulado pelas plantas foi obtido a partir do teor de N no tecido das plantas e a produção de matéria seca de cada um dos tratamentos.

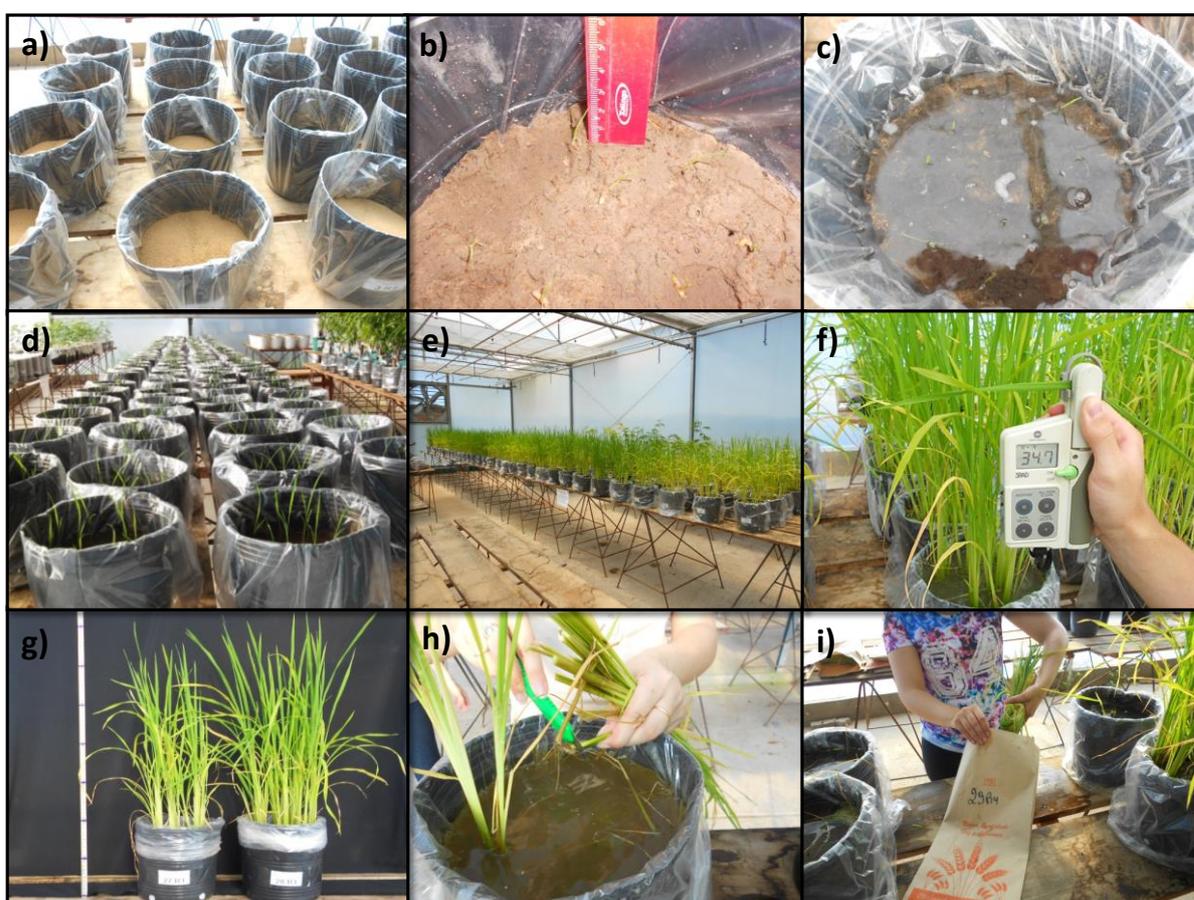


Figura 4 - Etapas da condução do experimento em casa de vegetação, preparo dos vasos (a), transplante das sementes pré-germinadas (b), aplicação da lâmina de água (c), visão geral do experimento no momento do desbaste das plântulas (d), visão geral do experimento no momento da leitura SPAD e coleta da parte aérea (e), leitura SPAD (f), altura das plantas de dois tratamentos no momento da coleta da parte aérea (g), coleta da parte aérea das plantas (h) e acondicionamento da amostra no momento da coleta para posterior secagem (i).

5.4 Análise estatística e interpretação

O teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica e o conteúdo de N absorvido e acumulado pelas plantas de arroz foram correlacionados (coeficiente de correlação (r) linear de Pearson ($P < 0,05$)) com as variáveis: quantidade de N obtida pelo método DSD; teor de MOS determinado segundo Tedesco et al. (1995) (índice denominado de MOS rotina); teor de MOS (teor de C total medido em analisador elementar x 1,724), índice denominado de MOS autoanalisador; teor de N total determinado analisador elementar e argila.

Para análise de correlações entre o teor de N mineralizado e as demais variáveis foram utilizados os valores de N mineralizado obtidos aos 28 dias de incubação, pelo fato desta avaliação apresentar o melhor coeficiente de correlação (r) com o N acumulado na parte aérea das plantas (ANEXO A).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Características gerais dos solos estudados

As amostras de solo coletadas para o estudo apresentaram grande amplitude nos teores de C total e, conseqüentemente, do teor MOS (estimado por essa variável), que variou de 8,3 a 61,2 g kg⁻¹ nos solos 7 e 32, respectivamente (Tabela 3). Neste aspecto, dos 32 solos coletados, a grande maioria (21 solos) se enquadrou na classe de baixo teor de matéria orgânica ($\leq 2,5\%$ MOS), 7 se enquadraram no nível médio (2,6 – 5,0% MOS) e 4 se enquadraram no nível alto ($> 5\%$ MOS) de matéria orgânica, conforme classificação de Boeni et al. (2010). Em trabalho de levantamento da evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no RS, Boeni et al. (2010) observaram que 71,1% das amostras de solos usadas no estudo pertenciam a classe de baixo teor de matéria orgânica, 13,4% na classe média, e 15,5% no nível alto. Os autores apontam ainda que a Depressão Central é a região com maior frequência (80,4%) de solos na classe de baixo teor de MOS e que os solos da região da Fronteira Oeste são os mais bem supridos de matéria orgânica, apresentando 30% das amostras analisadas na classe de elevado teor de MOS.

Quanto ao teor de argila dos solos, as amostras apresentaram uma variação de 100 a 482 g kg⁻¹, nos solos 1 e 32, respectivamente (Tabela 3), sendo uma amostra pertencente a faixa de $\leq 10\%$ de argila, 21 amostras à faixa de 11-25%, 6 amostras à faixa de 26-40% e 4 amostras à faixa de 41-50% de argila, e nenhuma amostra se apresentou com teor superior a 55%, conforme classificação de Boeni et al. (2010). Assim como para a MOS, a maioria dos solos também se enquadrou na classe de solos com baixo teor de argila (11-25% de argila), existindo uma relação direta destas duas variáveis.

O teor de N total variou de 0,5 g kg⁻¹ no solo 7 a 3,6 g kg⁻¹ no solo 28 (Tabela 3), seguindo comportamento similar ao teor de MOS nos diferentes solos. Os teores disponíveis dos nutrientes P, K, Ca e Mg e de Al trocável (Tabela 3) também apresentaram variações expressivas nos teores, o que está relacionado com as características intrínsecas de cada um dos solos e com o histórico de manejo e adubação destas áreas.

Tabela 3 - Características químicas e físicas dos solos coletados na profundidade de 0-20 cm nas diferentes regiões produtoras de arroz irrigado por inundação do estado do Rio Grande do Sul.

Solo	Areia ¹	Argila ¹	Silte ¹	N ²	C ²	MOS ²	pH-H ₂ O ³	P ⁴	K ⁴	Ca ⁵	Mg ⁵	Al ⁵	H+Al ⁶
 g kg ⁻¹						-	..mg dm ⁻³cmolc dm ⁻³			
1	742	100	157	0,6	6,0	10,3	4,7	6,8	32	2,9	0,8	1,0	4,4
2	679	106	215	0,9	7,9	13,6	6,8	23,8	100	4,2	1,2	0,0	1,7
3	830	119	51	0,9	8,3	14,3	6,5	39,4	92	2,0	0,7	0,3	2,5
4	680	121	199	0,8	9,3	16,1	4,9	4,5	56	2,8	0,7	0,7	3,5
5	410	132	459	1,0	10,5	18,1	6,5	21,8	96	2,6	1,2	0,3	2,5
6	664	135	201	0,7	5,3	9,2	4,9	10,1	56	2,6	0,9	2,3	6,2
7	728	141	131	0,5	4,8	8,3	4,9	9,3	88	6,3	2,1	0,3	3,5
8	619	148	233	0,9	7,4	12,7	6,5	16,2	72	8,0	1,2	0,0	2,5
9	629	169	203	2,0	22,7	39,2	5,9	11,8	64	2,4	0,7	0,6	4,9
10	129	183	688	1,2	9,3	16,1	6,0	3,0	64	6,7	1,7	0,4	4,4
11	699	184	118	1,1	13,6	23,4	4,6	3,7	64	1,9	0,4	2,3	9,7
12	458	189	354	1,2	14,3	24,7	5,4	7,6	72	5,7	2,1	0,1	3,5
13	184	191	625	1,0	11,2	19,3	5,3	4,5	92	4,8	1,7	0,3	4,4
14	583	214	203	1,2	11,8	20,3	5,6	3,0	28	9,8	3,6	0,6	6,9
15	473	219	309	0,8	8,4	14,6	6,0	7,6	152	21,7	4,4	0,0	1,6
16	216	221	563	1,3	14,9	25,6	5,4	3,7	80	4,8	2,0	0,1	3,5
17	313	221	466	1,4	14,3	24,6	4,8	3,0	92	3,3	1,2	0,6	4,4
18	409	223	368	1,2	12,5	21,5	4,7	3,7	80	4,4	1,5	2,5	7,7
19	151	225	625	1,2	13,3	22,9	4,9	3,7	160	5,4	2,2	1,3	6,2
20	468	225	307	0,6	5,8	9,9	5,6	10,9	100	11,9	4,3	0,0	2,8
21	559	244	197	1,5	16,2	27,9	6,1	3,7	44	17,3	5,2	0,0	3,9
22	365	252	383	1,1	10,8	18,6	5,5	8,4	96	8,3	3,2	0,0	3,1
23	470	266	264	1,7	15,3	26,3	6,0	6,0	84	21,2	7,2	0,1	4,4
24	226	287	487	2,0	24,5	42,2	6,7	6,8	96	26,9	6,7	0,0	2,0
25	238	314	448	1,9	22,4	38,6	5,6	6,8	56	5,8	1,9	1,2	6,9
26	454	322	223	1,8	17,3	29,8	5,3	10,9	92	5,8	0,8	2,0	9,7
27	283	336	381	1,4	13,4	23,1	4,8	10,9	88	6,3	2,5	1,8	6,9
28	95	388	517	3,6	33,7	58,0	6,2	18,0	492	18,7	7,3	0,1	3,5
29	139	418	443	1,4	14,6	25,1	5,0	5,3	112	4,6	1,8	1,9	8,7
30	111	427	462	2,4	30,3	52,2	6,1	18,9	200	24,1	5,6	0,0	3,1
31	37	449	514	2,9	34,5	59,5	6,5	6,8	80	26,1	9,2	0,0	2,5
32	178	482	340	2,6	35,5	61,2	5,7	15,3	88	15,3	5,7	0,2	6,2

¹ Teores de areia, silte e argila determinados pelo método da pipeta, ² MOS estimada pelo teor de C total determinado em analisador elementar, ² C e N totais determinados em analisador elementar, ³ pH em água, ⁴ P e K extraídos por Mehlich-1; ⁵ Ca, Mg e Al extraídos por solução de KCl 1 mol L⁻¹, ⁶ H + Al estimado pelo índice SMP (CQFS-RS/SC, 2004).

6.2 Estimativa da disponibilidade de N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado

O teor de N mineral acumulado em quatro semanas de incubação apresentou elevada associação ($r=0,89$) com o teor de N acumulado na parte aérea pelas plantas de arroz irrigado (Figura 5), demonstrando que este pode ser um bom indicativo da disponibilidade de N às plantas. Entretanto, os valores observados e/ou a escala destas duas variáveis não são exatamente iguais, ou seja, se para um solo qualquer foi observado um determinado valor no experimento de mineralização, o valor acumulado no tecido da parte aérea foi menor.

Essa diferença observada pode ser atribuída ao fato de, nas condições de cultivo a campo ou mesmo em casa de vegetação, a mineralização do N pode apresentar um padrão diferenciado com relação ao obtido na incubação em laboratório. A presença de plantas pode alterar as condições de aeração da rizosfera, que por sua vez afeta a atividade microbiana, resultando em efeito direto sobre a mineralização e disponibilidade do N (RHODEN, 2005). O aporte de material orgânico, via exsudação ou senescência de raízes das plantas de arroz, também pode proporcionar um aumento da biomassa microbiana que, ao degradar a MOS e os compostos orgânicos liberados pelas raízes, pode utilizar tanto o N orgânico presente no resíduo como o N mineral presente no solo para manter a relação C:N de equilíbrio (AOYAMA; NOZAWA, 1993), diminuindo sua disponibilidade às plantas.

Outro fator associado nesta diferença é que, no presente estudo, não foi contabilizada a massa radicular das plantas, que provavelmente assimilou e acumulou uma quantidade considerável de N, devido ao grande volume de raízes produzido pela cultura do arroz (BIANCHET, 2012). Além disso, podem ter ocorrido perdas de $N-NO_3^-$ no processo de desnitrificação após o alagamento do solo, onde o NO_3^- é reduzido pelos microrganismos anaeróbios após o consumo do O_2 pelos aeróbios, passando a N_2O e N_2 voláteis, os quais são perdidos para a atmosfera (PONNAMPERUMA, 1972), desaparecendo do solo com poucos dias de alagamento. Reduzindo deste modo o teor de N disponível às plantas, influenciando no menor acúmulo de N em relação ao mineralizado no experimento de incubação.

A diferença de temperatura entre os dois ambientes também é um fator importante que deve ser considerado, sendo este um fator abiótico ímpar nas reações químico-biológicas, atuando diretamente sobre a velocidade metabólica dos microrganismos, podendo acelerar ou retardar a atividade microbiana, atuando na regulação da decomposição da MOS e na mineralização do N. Inubushi et al. (1985) observaram que a mineralização do N da fração lábil, que acontece no período inicial de incubação, é dependente da temperatura, sendo

seguida de uma mineralização da fração lenta ou recalcitrante, a qual não é dependente da temperatura. Neste sentido, a temperatura utilizada neste trabalho foi de 40°C, conforme proposto por Bundy e Meisinger (1994), que favorece a mineralização de N em experimento de incubação anaeróbica de curta duração. Já Li et al. (2003) estudando a mineralização do N em solos chineses sob condições de alagamento, evidenciaram que houve um aumento da mineralização de 4-7,7% do N total do solo para 6,3-9,4% quando a temperatura usada passou de 25°C para 35°C, ocorrendo diferenças expressivas no teor de N mineralizado acumulado entre os solos e as diferentes temperaturas após 120 dias de incubação anaeróbica. Deste modo, considera-se que no experimento de incubação foram fornecidas as condições ambientais que potencializam as taxas de mineralização, como temperatura controlada e elevada, o que não acontece na mesma proporção no experimento de casa de vegetação, onde ocorrem oscilações entre as temperaturas diurnas e noturnas, mesmo sendo o experimento conduzido durante os meses de outubro, novembro e dezembro, quando as temperaturas foram elevadas.

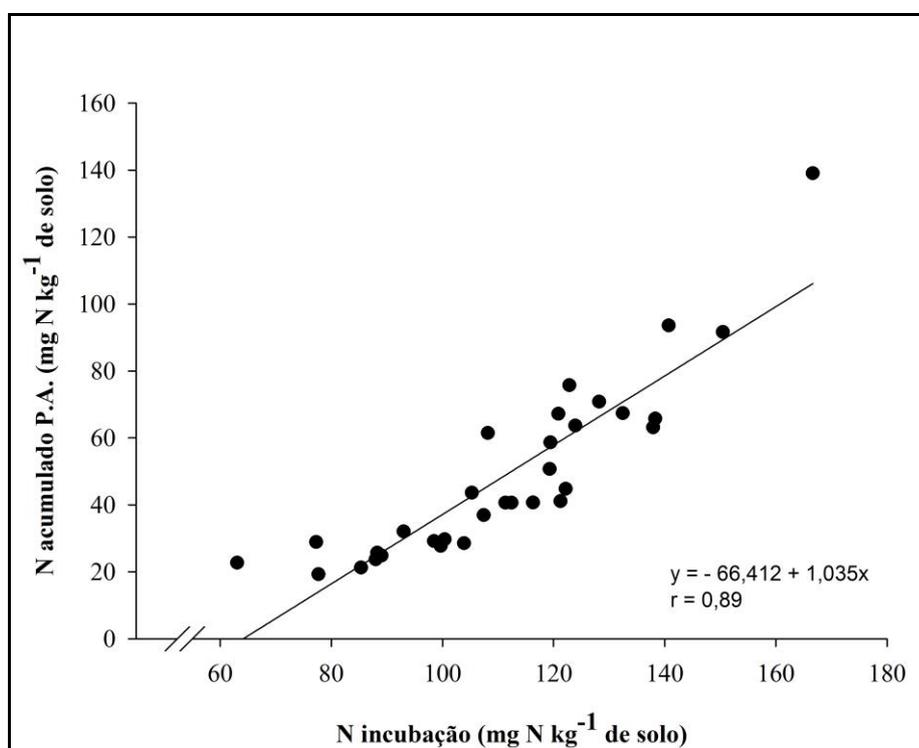


Figura 5 - Correlação entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) e a quantidade de N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas de arroz.

Os teores de MOS (tanto determinada em laboratório de rotina quanto a estimada pelo teor de carbono determinado em analisador elementar) e de N total do solo apresentaram elevada correlação (0,77, 0,84 e 0,84, respectivamente) com o N disponível após quatro semanas em incubação anaeróbica (Figuras 6a, 6c e 6e). Comportamento semelhante foi observado entre os teores desses parâmetros e os valores de N acumulados na parte aérea das plantas de arroz após 45 dias de cultivo (0,72, 0,77 e 0,83, respectivamente) (Figuras 6b, 6d e 6f). Houve também uma alta correlação entre os teores de N extraídos pelo método DSD e o N disponível (Figura 6e e 6g), enquanto que com o N acumulado pelas plantas foi ligeiramente menor (0,81) que o observado com o N total do solo (0,83) (Figuras 6f e 6h).

Embora todos os índices de disponibilidade de N apresentem altas correlações com os teores de N disponível após 28 dias de incubação e N acumulado pelas plantas, pode-se observar que ocorre uma tendência de aumento no coeficiente de correlação quando comparamos os índices que avaliam as frações totais da MOS com o N extraído pelo DSD. Esta tendência sinaliza que a avaliação de uma fração mais lábil do N pelo método DSD melhora a estimativa da disponibilidade de N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado em comparação com métodos que avaliam as frações totais de MOS. As elevadas correlações obtidas com o método DSD para os diferentes solos devem estar relacionadas com as frações nitrogenadas extraídas pelo método: $N-NH_4^+$ + N alcalino hidrolisável (principalmente na forma de açúcares aminados como, por exemplo, glucosamina, e aminoácidos como a glutamina) (KWON et al., 2009; ROBERTS et al., 2009a). Estas frações de N orgânico correspondem a frações lábeis da MOS, as quais estão mais disponíveis ao ataque microbiano, sendo mineralizadas e disponibilizadas às plantas com maior facilidade. Estas características de elevada correlação dos valores extraídos de diferentes solos com o N disponível após 28 dias de incubação e o N absorvido pelas plantas, aliado ao tempo de análise relativamente rápido, potencializa a utilização do método para análises em laboratórios de rotina.

Em termos práticos, as diferenças nos coeficientes de correlação entre a MOS rotina e o DSD não foram tão relevantes, o que poderia sugerir que uma mudança de método não causasse avanços na estimativa da disponibilidade de N. Entretanto, ao se analisar a dispersão dos valores da figura 6, pode-se observar que a maior parte dos pontos está concentrada nos menores valores de MOS, ao mesmo tempo em que se apresentam mais afastados da linha de tendência. Considerando que a maior parte dos solos de várzea do estado do RS apresenta baixos teores de MOS (BOENI et al., 2010), há um diferente comportamento quando se utiliza apenas os solos com teores de MOS abaixo de 35 g kg^{-1} (Figura 7).

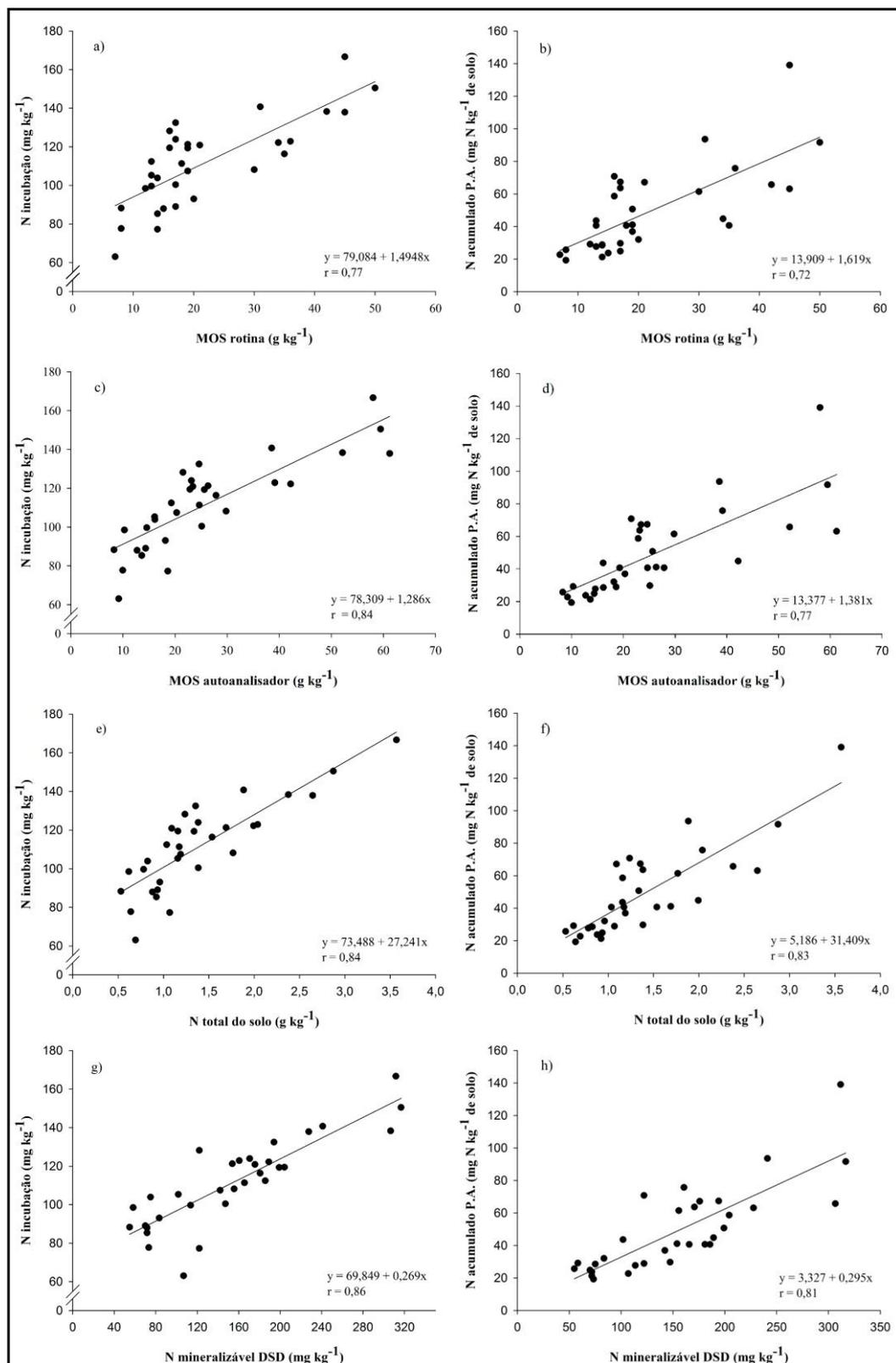


Figura 6 - Correlação entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) e MOS determinada em laboratório de rotina (a); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (c); N total do solo determinado em analisador elementar (e) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (g). Correlação entre N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas e MOS determinado em laboratório de rotina (b); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (d); N total do solo determinado em analisador elementar (f) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (h). r = coeficiente de correlação linear de Pearson.

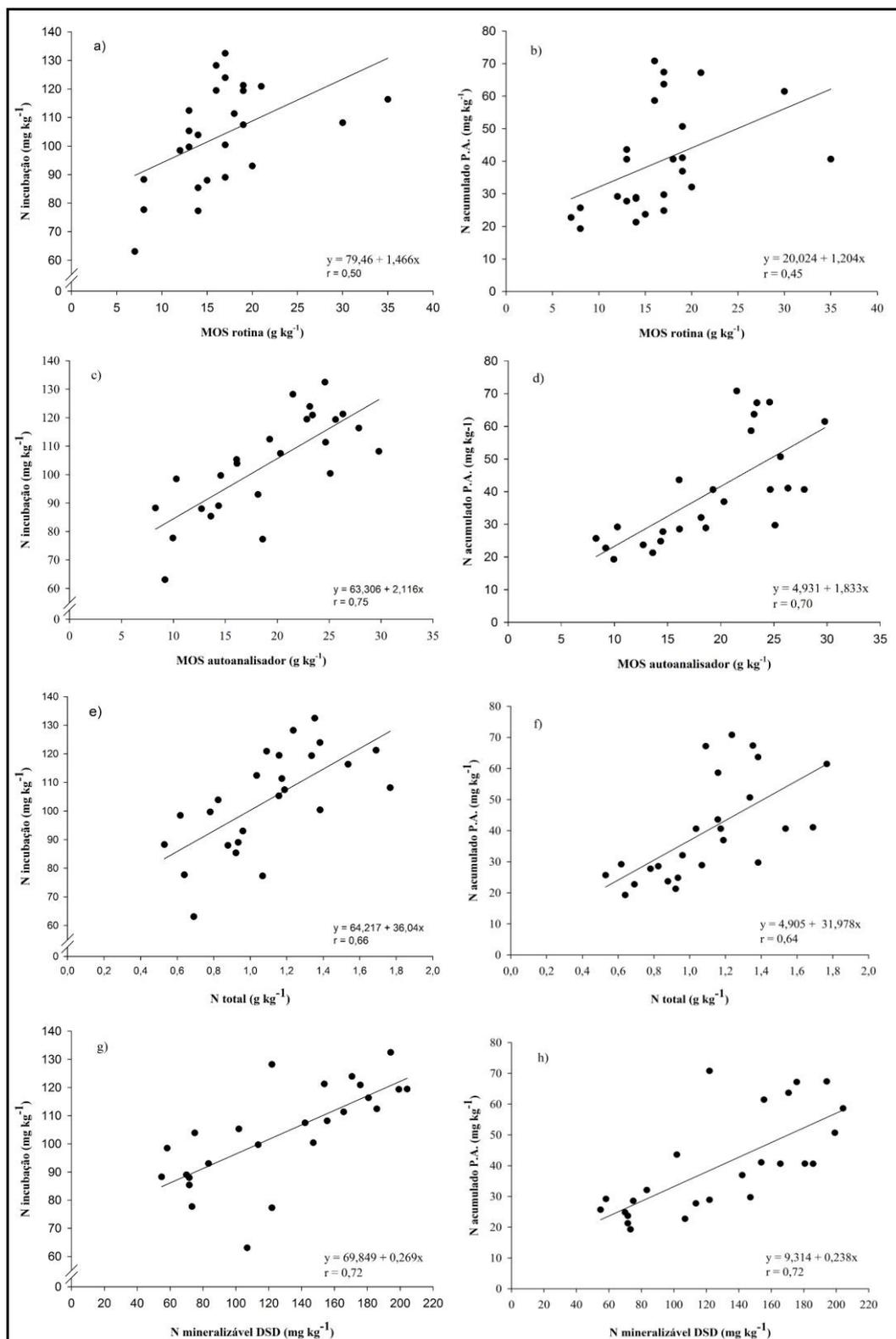


Figura 7 - Correlação entre o teor de N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) e MOS determinada em laboratório de rotina (a); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (c); N total do solo determinado em analisador elementar (e) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (g). Correlação entre N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas e MOS determinado em laboratório de rotina (b); MOS estimada pelo carbono determinado em analisador elementar (d); N total do solo determinado em analisador elementar (f) e N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (h). Solos com teor de MOS até 35 g kg⁻¹. r = coeficiente de correlação linear de Pearson.

Nesta condição, há uma expressiva redução do coeficiente de correlação da MOS rotina com os teores de N incubação e N acumulado, os quais passaram de 0,77 e 0,72 (Figuras 6a e 6b), para 0,50 e 0,45 (Figuras 7a e 7b). Ou seja, justamente nos solos com maior abrangência em termos de área de cultivo de arroz irrigado, o índice de referência para a interpretação da disponibilidade de N e recomendação da dose de fertilizante nitrogenado para as culturas obteve a pior correlação. A imprecisão do método de determinação da MOS adotado pelos laboratórios de rotina, justamente nos solos da classe de MOS com maior área de abrangência em termos de cultivo de arroz irrigado no estado do RS representa bem a dificuldade de se estimar a disponibilidade de N a partir da MOS para a cultura do arroz irrigado, bem como a baixa correlação obtida com os experimentos que envolvem doses de N e expectativa de produtividade de arroz irrigado.

Em contrapartida, para o N total, houve uma redução em menor proporção, enquanto que para o teor de MOS estimado pelo teor de C determinado em analisador elementar (extrator de alta intensidade, mas com elevada precisão) e o teor extraído pelo método DSD (Figura 7) não ocorreram grande variação, mantendo coeficientes de correlação elevados. Isto evidencia que o método DSD tem um potencial elevado para ser utilizado na avaliação da disponibilidade de N em solos cultivados com arroz irrigado.

As correlações obtidas entre MOS, N total com o N incubação (Figuras 6a, 6b e 6c) estão de acordo com as verificadas por Rhoden (2005) em trabalho de mineralização de N em incubação anaeróbica com solos de várzea do RS. Neste trabalho, o autor verificou correlação de 0,80 entre N mineralizado e N total, 0,91 entre N mineralizado e C orgânico, 0,82 entre N acumulado e N total e 0,90 entre N acumulado e C orgânico, salientando importância destes atributos na capacidade do solo em mineralizar N e na estimativa do N absorvido por plantas de arroz irrigado no primeiro cultivo. Em trabalho realizado por Pöttker e Tedesco (1979), investigando a mineralização do N em diversos solos do RS, os autores observaram que a correlação entre o N total dos solos e o N mineralizado é maior do que as obtidas entre o N mineralizado e a MOS, 0,85 e 0,75, respectivamente. Deste modo, os autores apontam que o teor de MOS e o teor de N total dos solos podem ser usados como índices da disponibilidade de N, pois apresentam alta correlação com ao N mineralizado anaerobiamente.

No entanto, em trabalho de Roberts et al, (2012), que avaliaram a influência da profundidade da amostragem do solo na relação entre os teores de N total e teor de C orgânico com o N acumulado pelas plantas e rendimento relativo da cultura, o comportamento destas variáveis foi distinto. Os autores observaram correlação positiva entre o teor de N total e N

absorvido pelas plantas, sendo o maior coeficiente de determinação observado de 0,53 (equivalente a $r=0,73$) na profundidade de 0 a 45 cm. Comportamento também verificado entre o teor de N total e rendimento relativo da cultura ($R^2=0,62$, equivalente a $r=0,79$), para a mesma profundidade. Quando estas mesmas comparações foram feitas com o teor de C orgânico, o maior coeficiente de determinação entre o teor de C orgânico e N acumulado foi de apenas 0,27 (equivalente a $r=0,52$), observado na camada de 0 a 60 cm. Quando foi realizada a relação entre teor de C e rendimento relativo da cultura, o coeficiente de determinação observado foi de 0,33 (equivalente a $r=0,57$), na camada de 0-45 cm, demonstrando que o teor de N total está muito mais associado com o N disponibilizado para as plantas que o teor de C orgânico do solo.

Devido ao fato dos teores de matéria orgânica e de N total do solo serem índices de disponibilidade de extração intensa (GIANELLO et al., 2000), há trabalhos que indicam que o N total também não seria um índice confiável de disponibilidade de nitrogênio para muitos solos (STANFORD, 1982). Como o N total do solo representa um compartimento dezenas ou centenas de vezes maior que o compartimento do N prontamente disponível para as plantas, cuja disponibilidade é regida por diversos fatores, seria demasiadamente simplificado medir a disponibilidade de N pela medida do conteúdo de N total (WANG et al., 2001). Segundo Magdoff (1991), o teor de N total ou variáveis que se correlacionam a ele não são adequados para prever a disponibilidade de N para as plantas em muitos tipos de solos e condições de manejo. Deste modo, percebe-se a importância da busca de novos indicadores de disponibilidade de N, para que se possa fazer calibrações e melhorar o atual sistema de manejo do fertilizante nitrogenado, considerando a capacidade de fornecimento de N do solo estimada por índices mais precisos.

Os resultados obtidos neste trabalho com o método DSD estão de acordo com que foi verificado por Sharifi et al. (2007), que observaram correlações significativas com o N mineralizado em 24 semanas de incubação aeróbia ($R^2=0,61$, equivalente a $r=0,78$), utilizando solos provenientes do Canadá e do nordeste dos Estados Unidos, e por Bushong et al. (2008), que verificaram coeficiente de determinação de 0,58 (equivalente a $r=0,76$) entre N mineralizado em 14 dias de incubação anaeróbia e o DSD, em 25 solos da principal região produtora de arroz do estado do Arkansas nos Estados Unidos. Ainda neste trabalho, os autores salientam que seria possível obter correlações mais elevadas, entretanto os solos utilizados no estudo possuíam diferentes propriedades físicas e químicas e eram provenientes de uma grande área geográfica. Deste modo, eles sugerem que a previsibilidade do DSD pode aumentar quando os solos são analisados com base em manejo do solo, área geográfica e

rotação de culturas. Neste aspecto, Bushong et al. (2007) observaram que quando 50 solos com diferentes propriedades químicas e origens geográficas foram reduzidos para 16 solos argilosos da metade leste do estado do Arkansas, o coeficiente de determinação para comparar o ISN'T (método também baseado no N alcalino hidrolisável, que possui alta correlação ($R^2=0,90$, equivalente a $r=0,95$) com o DSD) e N potencialmente mineralizável aumentou de 0,45 para 0,71 (equivalente a $r=0,67$ e $r=0,84$, respectivamente).

O trabalho de Roberts et al. (2011) também demonstrou elevada correlação entre o N alcalino hidrolisável estimado pelo DSD e os parâmetros da planta em solos do estado do Arkansas. Quando o N total absorvido pelas plantas e o rendimento da cultura foi correlacionado com o DSD, foram observados valores de R^2 de 0,46 (equivalente a $r=0,68$) e $R^2=0,73$ (equivalente a $r=0,85$), respectivamente. Ao se estabelecer modelos de regressão para a relação entre a taxa de N necessária para alcançar 95% de rendimento de grãos relativa com o N alcalino hidrolisável quantificado pelo DSD, atingiu-se elevado coeficiente de determinação (0,89 equivalente a $r=0,94$) quando se considerou a camada de amostragem de 0 a 45 cm. Esses resultados evidenciam que o N alcalino hidrolisável pode ser correlacionado e calibrado para a cultura do arroz, podendo aumentar a sustentabilidade da produção agrícola em longo prazo, enquanto reduz potenciais impactos ambientais provenientes do excesso de fertilização nitrogenada. No entanto, os autores salientam que devem ser tomadas medidas adequadas para garantir que o método seja utilizado dentro dos limites adequados (profundidade de amostragem do solo, época de amostragem do solo, etc.) para manter a sua capacidade preditiva e a probabilidade de sucesso.

6.3 Relação da leitura SPAD com o N potencialmente disponível e parâmetros da planta

A estimativa do teor de clorofila (leituras SPAD) apresentou correlação positiva com os teores de N extraído pelo DSD ($r=0,66$), produção de massa seca ($r=0,64$), teor de N no tecido ($r=0,93$) e N acumulado na parte aérea das plantas ($r=0,76$) (Figura 8). A maior correlação observada com as leituras SPAD foi o teor de N no tecido ($r=0,93$). Este comportamento é decorrente da natureza das leituras (unidades SPAD), que correspondem ao teor do pigmento presente na folha, sendo que a clorofila e o N se correlacionam positivamente na mesma cultura, uma vez que 70% do N contido nas folhas está nos

cloroplastos, participando da síntese e da estrutura das moléculas de clorofila (MARENCO; LOPES, 2005).

O menor coeficiente de correlação foi observado na produção de massa seca na parte aérea (Figura 8). Este comportamento está relacionado com a elevada produção de massa seca de alguns tratamentos, como no solo 28, onde o teor de N possivelmente acabou sendo diluído no tecido da parte aérea das plantas, resultando em uma menor síntese de clorofila, e conseqüentemente em leituras SPAD menores e/ou similares a solos que disponibilizaram menor conteúdo de N, mas produziram menos massa seca na parte aérea. Outro fato que pode estar associado a esse comportamento é que as leituras foram realizadas na última folha completamente expandida, e, mesmo nos solos onde a disponibilidade de N já estava reduzida e os sintomas de deficiência de N estavam visíveis nas plantas, as folhas mais jovens apresentavam uma coloração de um verde mais intenso, possivelmente devido a redistribuição de fotossintatos e nutrientes das folhas mais velhas para as folhas jovens (KIRKBY e RÖMHELD, 2007; LIMA et al. 2011). Ou seja, nestes casos, a leitura SPAD pode ter sido similar a dos tratamentos em que ocorreu uma elevada produção de massa seca e ocorreu diluição do teor de N no tecido das plantas (POCOJESKI et al., 2012).

Assim como para a produção de massa seca, o coeficiente de correlação entre o N mineralizável estimado pelo DSD e a leitura SPAD não apresentou um valor tão elevado (0,66). Este fato está relacionado com a característica de cada uma das avaliações, onde um aumento no teor de N potencialmente mineralizável não necessariamente reflete em um aumento proporcional na leitura SPAD, pois o N determinado pelo DSD é uma estimativa do N que poderá ser mineralizado e diversos são os fatores que podem influenciar as taxas de mineralização e disponibilização de N em cada solo, enquanto que a leitura SPAD correlaciona-se apenas com o teor de N no tecido. Em função disso, a relação do N potencialmente disponível com a leitura SPAD segue um comportamento similar ao observado para a produção de massa seca, sendo influenciado também pela diluição do teor de N no tecido, diminuindo o coeficiente de correlação.

Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com os observados por Silva et al. (2008), que verificaram relação direta entre as leituras do clorofilômetro com o teor de N nas folhas, produção de matéria seca e N acumulado pela parte aérea das plantas de arroz irrigado. Os autores salientam que as maiores leituras do clorofilômetro não se refletem diretamente em maior produtividade de grãos, sendo o valor de 36 unidades SPAD estimado como leitura crítica para a maior produtividade de arroz no estudo. Diversos trabalhos encontraram correlação positiva entre a leitura do clorofilômetro e teor de N no tecido da

cultura do arroz (TURNER e JUND, 1991; PENG et al., 1993; POCOJESKI et al., 2012), evidenciando o potencial de utilização deste equipamento para indicar a suficiência do teor de N no tecido para a cultura do arroz irrigado, sendo uma ferramenta para complementar a avaliação da disponibilidade de N estimada pela análise de solo, monitorando o estado nutricional das plantas durante o cultivo.

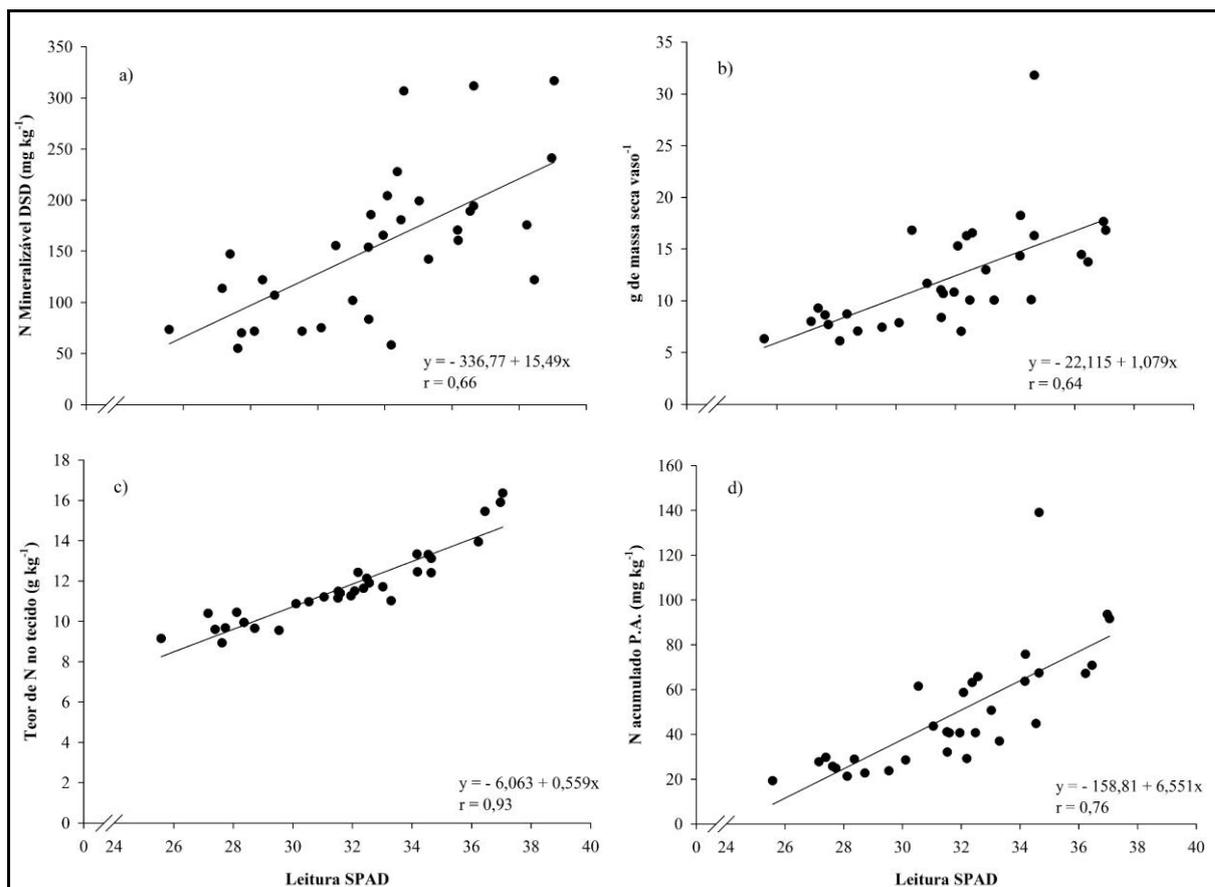


Figura 8 - Correlação das leituras SPAD com teor N potencialmente mineralizável previsto pelo método DSD (a), produção de massa seca (b), teor de N no tecido (c) e N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas (d).

6.4 Influência do teor de argila do solo na disponibilidade de N

Os valores de N estimados pelo método DSD, N disponível ($N-NH_4^+ + N-NO_3^-$) após 28 dias de incubação anaeróbica e N acumulado na parte aérea das plantas, apresentaram uma amplitude grande para os diferentes solos do estudo. O teor de N estimado pelo DSD variou de 55 mg kg⁻¹ N até 317 mg kg⁻¹ N. Por sua vez, o teor de N disponível apresentou uma

amplitude de 63 mg kg^{-1} até 167 mg kg^{-1} , enquanto que o N acumulado variou de 19 mg kg^{-1} até 139 mg kg^{-1} (Figura 9). Este comportamento está atrelado com as distintas características dos solos (Tabelas 2 e 3), com variação nos teores de MOS e argila, sendo que esta confere proteção e estabilidade à matéria orgânica, influenciando o ataque microbiano. Deste modo, pode-se observar tendência de aumento no teor de MOS, conforme o incremento de argila dos solos (Figura 9).

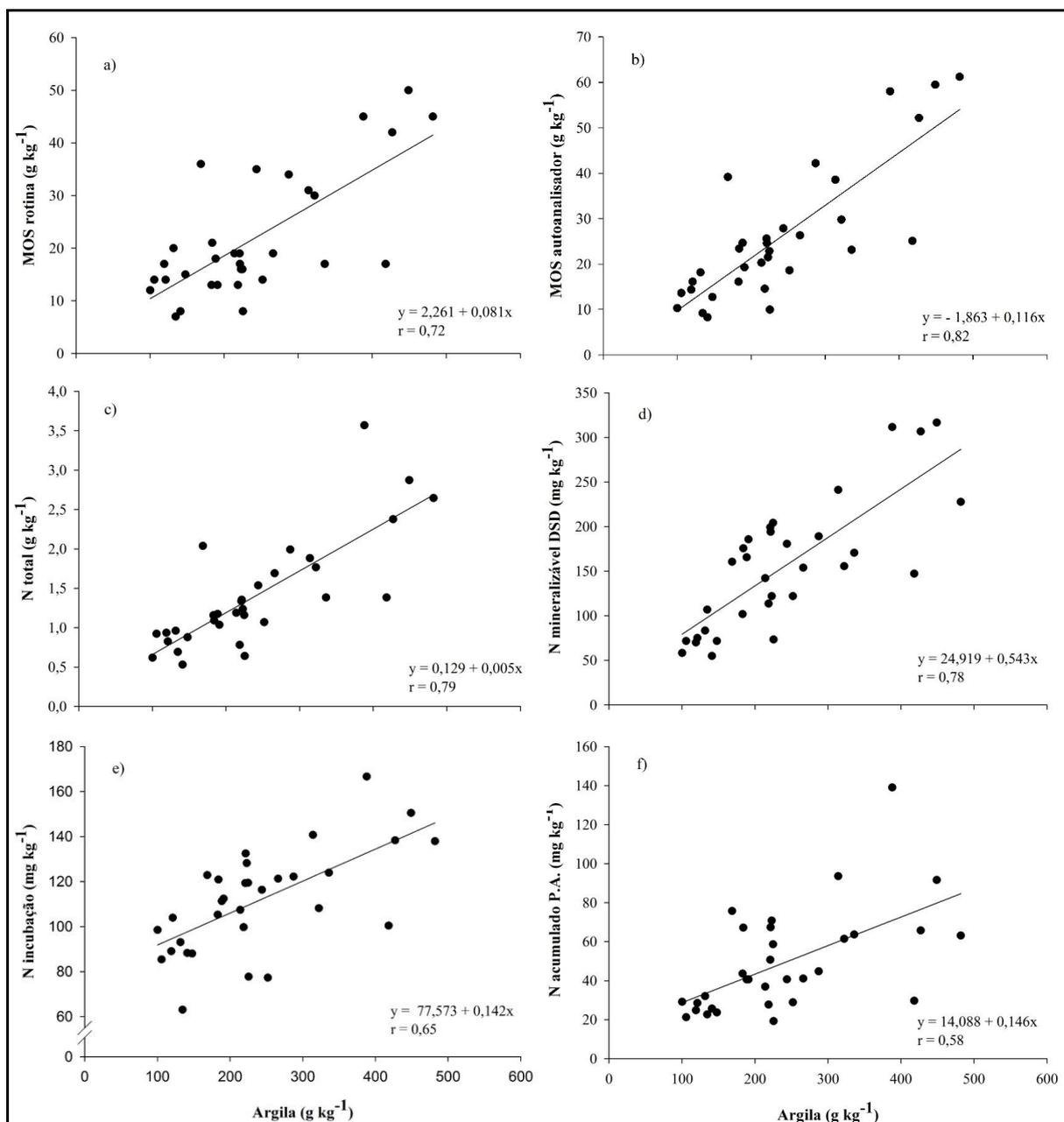


Figura 9 - Relação do teor de argila com a MOS determinada em laboratório de rotina (a); MOS estimada a partir do teor de C determinado em analisador elementar (b); N total determinado em analisador elementar (c); N potencialmente mineralizável estimado pelo DSD (d); N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação) (e) e N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas (f).

Diversos trabalhos têm apontado que a mineralização do N e sua intensidade depende de vários fatores, tais como: tipo de solo, teor de MOS, teor de N total, da relação C/N, pH do solo, temperatura, umidade, aeração, da interação planta-solo e da presença de outros nutrientes, além do pré-tratamento recebido pela amostra de solo (BLACK, 1968; PÖTTKER e TEDESCO, 1979; INUBUSHI et al., 1985; PARENTONI et al., 1988; SILVA et al., 1994; CAMARGO et al., 1997; VAHL, 1999; CAMARGO et al., 1999; BENBI e RICHTER, 2002). Camargo et al. (1997), estudando o potencial de mineralização do N aerobiamente, observaram que o teor de argila influenciou na percentagem de mineralização do N, possivelmente devido à formação de complexos organo-minerais entre a argila e a MOS.

Neste sentido, o teor de argila do solo também é um importante atributo de solo que deve ser considerado quando do estudo do N mineralizado, devido a sua relação com a MOS. Este fato é evidenciado pelo elevado coeficiente de correlação entre o teor de argila do solo e os índices MOS, N total e N mineralizável previsto pelo DSD, ao passo que para as variáveis N incubação e absorvido pelas plantas houve correlação moderada (Figura 9). Assim, se os índices de disponibilidade de N apontam valores mais elevados quanto maior o teor de argila do solo, enquanto que com a mineralização e o acúmulo de N não se observa este comportamento, fica evidente a influência do teor de argila nas taxas de mineralização e disponibilidade do N, bem como a necessidade de se considerar este atributo do solo no momento de calibração e recomendação da dose de fertilizante nitrogenado.

A inclusão do teor de argila na recomendação de adubação nitrogenada já vinha sendo considerada no estado do Arkansas nos EUA, onde a recomendação da adubação era realizada com base na cultivar, cultura anterior, e textura do solo (WILSON et al., 2001, apud ROBERTS et al, 2011, p.2), ainda sem levar em conta o N potencialmente mineralizável do solo. Atualmente, o método DSD é utilizado como indicativo de disponibilidade de N em protocolo de recomendação denominado de N-STaR. A influência da textura do solo sobre o N alcalino hidrolisável exigiu o desenvolvimento de diferentes curvas de calibração com base na textura do solo (ROBERTS et al., 2011), estando atualmente disponíveis aos produtores dois protocolos específicos (desde a amostragem do solo até a recomendação da adubação nitrogenada), sendo um referente à produção de arroz em solos arenosos e argilo-siltosos, e outro para a produção em solos argilosos.

A produção de matéria seca na parte aérea e o teor de N absorvido pelas plantas de arroz irrigado durante um período de 45 dias de cultivo apresentou uma amplitude bastante grande entre os 32 solos estudados (Tabela 4). Predominantemente, as plantas de arroz

cultivadas nos solos que continham uma maior reserva de matéria orgânica, como os solos 9 e 28, produziram maior quantidade de matéria seca e, conseqüentemente, acumularam mais N que os solos com menor conteúdo de matéria orgânica, como os solos 2 e 20, por exemplo (Tabela 4). A maior produção de matéria seca está relacionada com a maior disponibilidade de N mineral com o alagamento (especialmente o NH_4^+), conforme resultados obtidos no experimento de incubação (Tabela 4).

O N absorvido pelas plantas de arroz irrigado deve ter sido totalmente proveniente da mineralização do N da MOS. Como os solos permaneceram sempre alagados, em anaerobiose, o N absorvido foi proveniente do teor de N inicial (N-NO_3^- e N-NH_4^+), anterior à incubação, e do N proveniente da decomposição anaeróbia das frações mais lábeis da MOS. A manipulação dos solos na moagem provavelmente acelerou a atividade microbiana, o que favoreceu a mineralização do N, além das frações mais lábeis de N, influenciando diretamente o N absorvido pelas plantas.

Outra avaliação que pode ser feita com relação à mineralização e ao acúmulo de N pelas plantas nos diferentes solos é a relação N mineralizado/N total e N acumulado/N total. Neste sentido, a amplitude da relação N mineralizado/N total variou de 4,7% no solo 28 a 16,6% no solo 7, enquanto que a relação N acumulado/N total seguiu a mesma tendência, variando de 6,4% no solo 29 a 14,5% no solo 7 (Tabela 4), mostrando a grande diferença com relação a capacidade dos solos em mineralizar e acumular N em função de sua reserva orgânica. Apesar do menor conteúdo de N no solo, pode-se verificar que existe uma tendência de aumento na relação N mineralizado/N total à medida que diminui o teor de argila do solo, da mesma forma para a relação N acumulado/N total. Comportamento similar ocorre quando se considera o teor de C orgânico e de N total do solo. Este comportamento é decorrente, muito provavelmente, da maior facilidade de acesso à MOS pelos microrganismos e enzimas, nos solos de textura mais arenosa, fazendo com que uma maior parcela da MOS seja mineralizada, disponibilizando boa parte da reserva de N. Este comportamento também explica o fato da maioria dos solos arenosos apresentarem baixos teores de MOS.

Tabela 4 - Produção de massa seca na parte aérea das plantas (P.A.), teor de N total no solo, teor de N no tecido das plantas, N mineralizado em incubação anaeróbica (N min.), N acumulado na parte aérea (N acum.), relação entre teor de N total do solo e N mineralizado e relação entre N total do solo (Nm/Nt) e N acumulado na parte aérea (Na/Nt).

Solo	Massa Seca P.A.	N total solo	N min.	N acum.	Relação Nm/Nt	Relação Na/Nt
	g vaso ⁻¹	...g kg ⁻¹ mg kg ⁻¹ %	
1	7,0	0,6	98	29	15,9	14,2
2	6,1	0,9	85	21	9,3	6,9
3	7,7	0,9	89	25	9,5	8,0
4	7,9	0,8	104	29	12,6	10,4
5	8,4	1,0	93	32	9,7	10,0
6	7,1	0,7	63	23	9,1	9,9
7	8,6	0,5	88	26	16,6	14,5
8	7,4	0,9	88	24	10,0	8,1
9	18,2	2,0	123	76	6,0	11,1
10	11,7	1,2	105	44	9,1	11,3
11	14,5	1,1	121	67	11,1	18,5
12	10,8	1,2	111	41	9,5	10,4
13	10,7	1,0	112	41	10,9	11,8
14	10,1	1,2	107	37	9,0	9,3
15	8,0	0,8	100	28	12,8	10,6
16	13,0	1,3	119	51	8,9	11,4
17	16,3	1,4	132	67	9,8	14,9
18	13,7	1,2	128	71	10,4	17,2
19	15,3	1,2	119	59	10,3	15,2
20	6,3	0,6	78	19	12,2	9,0
21	10,1	1,5	116	41	7,6	7,9
22	8,7	1,1	77	29	7,2	8,1
23	11,0	1,7	121	41	7,2	7,3
24	10,1	2,0	122	45	6,1	6,7
25	17,7	1,9	141	94	7,5	14,9
26	16,8	1,8	108	61	6,1	10,4
27	14,3	1,4	124	64	9,0	13,8
28	31,8	3,6	167	139	4,7	11,7
29	9,3	1,4	100	30	7,3	6,4
30	16,6	2,4	138	66	5,8	8,3
31	16,8	2,9	150	92	5,2	9,6
32	16,3	2,6	138	63	5,2	7,2

Nos solos 30, 31 e 32 é possível observar ligeira redução no teor de N disponível após 28 dias de incubação, em comparação com o solo 28, que também possui alto teor de MOS (acima de 5%) (Figura 10). Este comportamento também é observado em maior intensidade para o N acumulado na parte aérea das plantas (Figura 10) e a produção de massa seca (Tabela 4). Esse comportamento pode estar relacionado com o distinto manejo empregado nas áreas, onde o solo 28 estava sendo manejado com pastagens por vários anos, ou seja, sem o revolvimento constante do solo empregado nas áreas de cultivo de arroz irrigado, com sucessivas arações e gradagens, como nos solos 30 e 32, assim como o solo 31, que estava com pastagem apenas por uma safra. Diferentemente do manejo empregado nos sistemas de produção de sequeiro, como o sistema de semeadura direta, onde se visa o mínimo de revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos na superfície do solo, o manejo de solo adotado na grande maioria das áreas cultivadas com arroz irrigado por inundação é com sistemas que utilizam o revolvimento do solo e, conseqüentemente, a incorporação da palha.

Este tipo de manejo se justifica por algumas necessidades práticas de cultivo, como diminuir o volume de resíduos culturais em superfície, uma vez que a decomposição anaeróbia de resíduos vegetais em solos alagados produz uma série de compostos intermediários, entre os quais se destacam os ácidos orgânicos alifáticos de baixo peso molecular, como os ácidos fórmico, acético, propiônico e butírico (CAMARGO et al., 2001; SOUSA et al., 2002), que são tóxicos ao arroz (SOUSA; BORTOLLON, 2002). Nestas condições, o acúmulo dos ácidos orgânicos prejudica o desenvolvimento da cultura, principalmente pela inibição da elongação das raízes e da absorção de nutrientes. A toxidez por ácidos orgânicos na cultura do arroz irrigado se manifesta, principalmente, nas fases iniciais de desenvolvimento, caracterizando-se pela menor germinação, crescimento radicular, peso e altura de plântulas (SOUSA; BORTOLLON, 2002). Em casos de toxidez mais severa, os prejuízos ao crescimento das plantas podem ocorrer em outras fases, resultando em menor perfilhamento, menor absorção de nutrientes e menor rendimento de grãos (CAMARGO et al., 2001).

Deste modo, os solos 30, 31 e 32 apresentam um histórico de cultivo de arroz e mobilização do solo mais frequente, onde a MOS pode estar sendo constituída por compostos mais recalcitrantes, sendo que a fração mais lábil já tenha sido decomposta em decorrência do constante revolvimento e exposição da MOS à ação microbiana. Ao contrário do que deve ter ocorrido no solo 28, onde uma maior parte da MOS pode estar composta por frações mais lábeis, que devido ao preparo do solo para a montagem dos experimentos tenha ficado mais acessível aos microrganismos, mineralizando e disponibilizando maior quantidade de N às

plantas, o que se refletiu em maior produção de massa seca e acúmulo do nutriente na parte aérea das plantas.

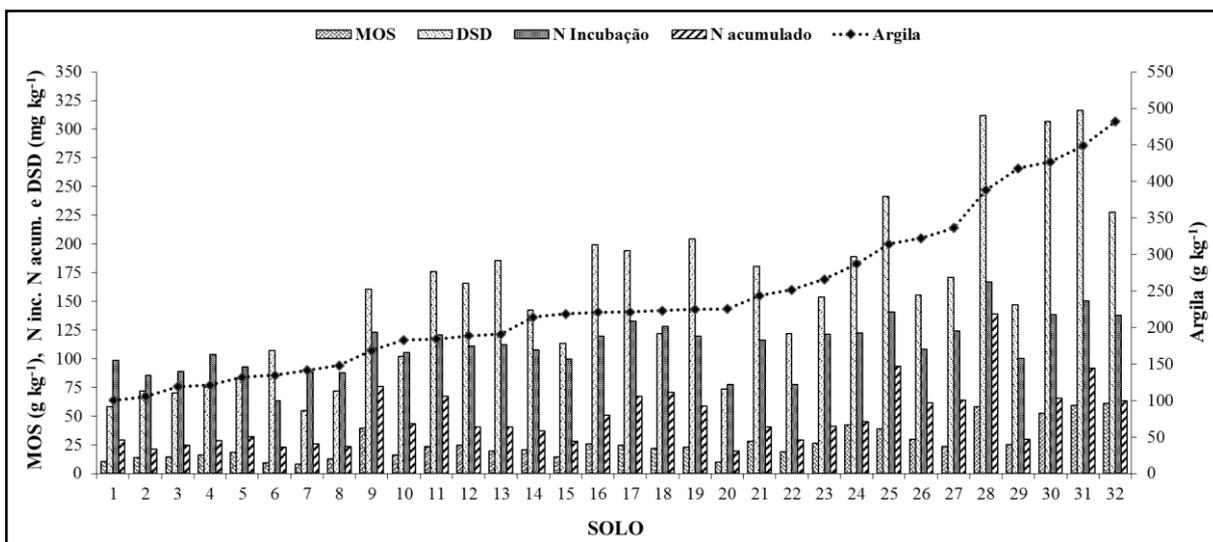


Figura 10 - Relação do teor de argila com os teores de MOS estimada pelo teor de C determinado em analisador elementar, N estimado pelo DSD, N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica (N inc.) e N acumulado na parte aérea das plantas (N acum.).

Um segundo fato que pode estar associado com este comportamento é a mineralogia predominante, uma vez que os solos 30, 31 e 32 são da ordem dos Vertissolos e o solo 28 é um Chernossolo. Deste modo, o caráter expansivo, a maior área superficial específica (ASE) e a capacidade de troca de cátions (CTC) desses solos podem estar aumentando a oclusão da MOS, reduzindo o ataque microbiano e a ação enzimática e, por consequência, havendo uma menor mineralização e disponibilidade de N para as plantas. A proteção e estabilidade da MOS está relacionada à sua recalcitrância molecular, resultante da composição e arranjo estrutural, da proteção física por oclusão em agregados de solo e da estabilidade química devido à sua interação com componentes minerais (GOLCHIN et al., 1994; CHRISTENSEN, 1996; CHENU; PLANTE, 2006; AITA; GIACOMINI, 2007). Desta mesma forma, o teor de argila também influencia a capacidade de extração por métodos químicos de intensidade média ou baixa (ROBERTS et al., 2011), que avaliam os fatores intensidade e capacidade de liberação de nitrogênio mineralizado.

As diferenças observadas demonstram que os solos possuem características intrínsecas que atuam diretamente sobre a decomposição da MOS, que aliadas às condições de alagamento, determinam a capacidade de mineralização de N de cada solo. Deste modo,

diferenças na capacidade de mineralização de N dos solos resultam em diferenças na disponibilidade e, conseqüentemente, na absorção de N pelas plantas. Esse tipo de comportamento auxilia no entendimento da possibilidade de se obter diferentes rendimentos relativos, tanto em solos com baixos como altos teores de MOS, o que prejudica a predição da recomendação de adubação nitrogenada (SCIVITTARO; MACHADO, 2004), independentemente do método de diagnóstico. Entretanto, estas variáveis que afetam a disponibilidade de N podem ser consideradas na calibração e recomendação do fertilizante nitrogenado para a cultura do arroz. Neste sentido, percebe-se a importância de se buscar novos parâmetros capazes de indicar a disponibilidade de N para solos aptos ao cultivo de arroz irrigado por alagamento.

7 CONCLUSÕES

1. O teor de MOS determinado em laboratório de rotina apresenta menor coeficiente de correlação com o N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica e o teor de N acumulado na parte aérea das plantas, especialmente nos solos com até 35 g kg⁻¹ de MOS, evidenciando as limitações deste método no sistema de recomendação da adubação nitrogenada para o arroz irrigado.
2. A estimativa do nitrogênio potencialmente mineralizável obtida pelo método DSD apresenta elevada correlação com o N disponível após 28 dias de incubação anaeróbica e o teor N acumulado pelas plantas de arroz, demonstrando potencial de utilização para indicar a disponibilidade de N em solos sob cultivo de arroz irrigado por alagamento no estado do RS.
3. O teor de argila do solo influencia a mineralização, disponibilidade e acúmulo de N pelas plantas de arroz, sugerindo a necessidade de se incluir este parâmetro do solo na calibração, interpretação e/ou recomendações do fertilizante nitrogenado para a cultura do arroz irrigado.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados verificados no presente estudo, apontam o potencial de utilização do N alcalino hidrolisável extraído pelo método DSD para determinar o N potencialmente mineralizável a partir da matéria orgânica nos solos sob cultivo de arroz irrigado por alagamento no RS. Entretanto, há necessidade de estudos complementares, verificando possíveis fatores, além do teor de argila do solo, que possam interferir nas frações de N alcalino hidrolisável, como a profundidade de amostragem, conforme apontado nos trabalhos de Mulvaney et al. (2006) e Roberts et al. (2009b).

Uma vez identificados os possíveis fatores de interferência, serão necessários estudos de longa duração, voltados à calibração da dose de N requerida pela cultura do arroz irrigado, a partir do teor de N mineralizável obtido pelo DSD em diferentes solos. Neste sentido, um primeiro passo seria a obtenção da dose de N necessária para alcançar um determinado rendimento relativo, como por exemplo 90, 95 ou 100%, conforme utilizado no protocolo N-STaR nos EUA. A segunda etapa seria correlacionar o N alcalino hidrolisável quantificado pelo DSD, com a dose de fertilizante nitrogenado necessária para alcançar o rendimento relativo previsto. De posse dessas informações será possível gerar equações de calibração para interpretar as doses de N necessárias para atingir o rendimento relativo pretendido em um determinado solo e, com isso, avaliar se efetivamente ocorreu a melhoria almejada no sistema de recomendação de fertilização nitrogenada para o arroz irrigado no estado do RS.

Diante disso, se percebe a dificuldade e complexidade de fatores envolvidos em estudos de calibração de novos métodos/índices de disponibilidade de nutrientes, requerendo muito tempo, recursos e espaço. No entanto, a identificação e calibração de um método de análise de solo que se correlaciona com parâmetros de produtividade do arroz e que possa ser utilizado nas recomendações de adubação nitrogenada, é cada vez mais importante e será essencial para a viabilidade econômica e a sustentabilidade em longo prazo no sistema de produção de arroz irrigado.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C. et al. **Microbiologia Agrícola**. Apostila didática – aulas teóricas. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. março, 2005. 114p.

AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre de diversos sistemas de exploração agrícola. In: YAMADA, T.; STIPP, S.R. & VITTI, A.G.C., orgs. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, 2007. Cap. 1, p.2-41.

ANDRADE, A. C. et al. Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, Edição especial, p. 1643-1651, 2003.

AOYAMA, M; NAZAWA, T. Microbial biomass nitrogen and mineralization-immobilization processes of nitrogen in soils incubated with various organic materials. **Soil Science and Plant Nutrition**. Tokyo, v. 39, n.1, p. 23-32, 1993.

ARGENTA, G. et al. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 27, p. 109-119, 2003.

BARBOSA FILHO, M.P. Calagem e adubação. In: STONE, L. F., et al. **Arroz: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, D.F.: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. p. 35-72.

BARTLETT, R.J.; JAMES, B.R. Redox chemistry of soil. **Advances in Agronomy**, New York, v. 50, p. 151-208, 1993.

BENBI, D.; RICHTER, J. A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization. **Biology and Fertility of Soils**. Berlin, v.35, p. 168-183, 2002.

BIANCHET, P. **Disponibilidade de N ao arroz irrigado em função da inoculação com bactérias promotoras de crescimento e do manejo dos resíduos culturais**. 2012. 118p. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC. Lages-SC, 2012.

BLACK, C. A. Nitrogen: Mineralization and immobilization. In: BLACK, C. A. (ed) **Soil-Plant Relationship**, 2. ed. New York, John Wiley, 1968. p. 419-452.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.R. Regulação da absorção e assimilação de nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.30, p.365-372, 2001.

BOENI, M. et al. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA/Estação experimental. Seção de Agronomia, 2010. 40p. (Boletim técnico n° 09).

BUNDY L. G.; MEISINGER, J.J. Nitrogen availability indices. In: WEAVER, R.W. et al. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America. Madison, p.951-984, 1994.

BUSHONG, J.T. et al. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. Athens, v.38, p.2799-2813, 2007.

BUSHONG, J.T. et al. Evaluation of distillation and diffusion techniques for estimating hydrolyzable amino sugar-nitrogen as a means of predicting N mineralization. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 72, p. 992-999, 2008.

CASSMAN, K.G. et al. Soil organic matter and the indigenous nitrogen supply of intensive irrigated rice systems in the tropics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.182, n. 2, p.267-278, 1996.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 21:575-579, 1997.

CAMARGO, F.A., O.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. Nitrogênio orgânico do solo. In: CAMARGO, F.A., O., SANTOS, F.A. (eds) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, 1. ed. Porto Alegre, Gênese, 1999, p.117-137.

CAMARGO, F.A.O. et al. Aspectos fisiológicos e caracterização da toxidez de ácidos orgânicos voláteis em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.3, p.523-529, 2001.

CANTARELLA, H. Matéria orgânica e nitrogênio do solo. In: BÜLL, L.T.; ROSOLEM, C.A. (Eds.) **Interpretação de análise química de solo e planta para fins de adubação**. Botucatu, Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. 1989. p.37-74.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, 2007. p.375-470.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. *In:* SANTANA, N.B.M., (Ed.) **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus, CEPLAC/SBCS, 1986. p. 47-79.

CHENU, C.; PLANTE, A.F.; PUGET, P. Organo-Mineral Relationships. *In:* Lal R. (ed) **Encyclopedia of Soil Science**. CRC Press, Boca Raton, pp 1227–1230, 2006.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. *In:* **Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils**. Eds. M. R. Carter & B. A. Stewart. pp 97-165. CRC Press, Inc, Boca Raton, FL, 1996.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: NRS/SBCS, 2004. 400 p.

CURTIN, D.; McCALLUM, F.M. Biological and chemical assays to estimate nitrogen supplying power of soils with contrasting management histories. **Australian Journal of Soil Research**. Collingwood, v. 42, p. 737-747, 2004.

DOLMAT, M.T.; PATRICK, W.H.; PETERSON, F.J. Relation of available soil nitrogen to rice yield. **Soil Science**. Baltimore, v.129, n. 4, p.229-237, 1980.

DERSCHE, G.; PFEFFER, M.; DANNEBERT, O.H. Determination of the N mineralization potential of different soils by anaerobic incubation as calibrated in a pot-experiment. **Bodenkultur**. Vienna, v. 42, p. 69-81, 2003.

DROZDOWICZ, A. Bactérias do solo. *In:* VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Eds.). **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA – CPAC, 1997. p. 17-60.

DUXBURY, J.M. et al. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. *In:* COLEMAN, D.C. et al. (eds.) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems** Honolulu, University of Hawaii, 1989. p.33-67.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed., Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Manejo do Nitrogênio. In: FAGERIA, N.K.; STONE, L.F.; SANTOS, A.B. dos. **Manejo da Fertilidade do Solo para o Arroz Irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003, p.51-94.

FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.B.; CUTRIM, V.A. Produtividade de arroz irrigado e eficiência de uso do nitrogênio influenciadas pela fertilização nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.7, p.1029-1034, 2007.

FOX, R.H.; PIEKIELEK, W.P. Relationships among anaerobic mineralized nitrogen, chemical indexes, and nitrogen availability to corn. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 48, p. 1087-1090, 1984.

GARCIA, F.O.; DAVEREDE, I.C. Diagnóstico para recomendação de adubação nitrogenada em culturas de interesse agrônomo. In: YAMADA, T.; STIPP, S.R., VITTI, A.G.C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. International Plant Nutrition Institute – Brasil. Piracicaba – SP, 2007, cap. 8, p. 177 - 320.

GIANELLO, C. et al. Avaliação da disponibilidade do nitrogênio do solo estimada por métodos químicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 24:93-101, 2000.

GOLCHIN, A. et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.32, p. 285-309, 1994.

GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; SASAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.25, p. 601-616, 2001.

HERBERT, R. A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. **FEMS Microbiology Reviews**. London, v.23, p. 563-590, 1999.

HÜBNER, A.P. **Identificação de bactérias diazotróficas endofíticas do grupo bacillus associadas a raízes de plantas de arroz irrigado**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

INUBUSHI, K.; WADA, H.; TAKAI, Y. Easily decomposable organic matter in paddy soil. VI. Kinetics of nitrogen mineralization in submerged soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.4, p. 563-572, 1985.

IRGA. **Instituto Rio Grandense do Arroz**. Disponível em: <URL:

http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf. Acesso em: 29 Abril. 2014.

IRRI. Use of leaf color chart (LCC) for N management in rice. **Crop Resource Management. Network Technology**. Brief 2. IRRI, Manila, Philippines, 1996.

KEENEY, D.R.; BREMNER, J.M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. **Agronomy Journal**. Madison, v. 58, p. 498-503, 1966.

KHAN, S.A.; MULVANEY, R. L.; HOEFT, R.G. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.65, p.1751–1760, 2001.

KIRKBY, E.A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Informações Agronômicas N° 118**. – International Plant Nutrition Institute. Piracicaba, 2007.

KLAPWYK, J.H.; KETTERINGS, Q.M. Reducing analysis variability of the Illinois soil nitrogen test with enclosed griddles. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 69, p. 1129–1134, 2005.

KWON, H.Y.; HUDSON, R.J.M.; MULVANEY, R.L. Characterization of the organic nitrogen fraction determined by the Illinois Soil Nitrogen Test. **Soil Science Society of America Journal**. Madison v. 73, p.1033–1043, 2009.

LADD, J.N.; FOSTER, R.C.; SKJEMSTAD, J.O. Soil Structure: carbon and nitrogen metabolism. **Geoderma**. Amsterdam, v. 56, p. 401-434, 1993.

LI, H.; HAN, Y.; CAI, Z. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: dynamic and model fitting. **Geoderma**. Amsterdam, v.115, n. 3, p.161-175, 2003.

LIMA, R.L.S. et al. Redistribuição de nutrientes em folhas de pinhão-mansão entre estádios fenológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.15, n.11, p.1175–1179, 2011.

LORENSI, J. **Dinâmica do nitrogênio mineral e produtividade do arroz irrigado na sucessão soja-azevém em solo de várzea**. 2011, 128 p. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2011.

MAGDOFF, F.R. Field nitrogen dynamics: implications for assessing N availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. Athens, v.22, p.1507-1517, 1991.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319p.

MALAVOLTA, E.; GOMES, F.P.; ALCARDE, J.C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2002. 200 p.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M.F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; STIPP, S.R.; VITTI, A.G.C., orgs. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, 2007. Cap. 6, p.189-249.

MARENCO, R.A; LOPES, N.F. **Fisiologia Vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 2. ed. Viçosa: UFV. 439p, 2005.

MARTHA JÚNIOR, G. et al. Perda de amônia por volatilização em pastagem de capim-tanzânia adubada com uréia no verão. **Revista Brasileira de Zootecnia**. Viçosa, v. 33, n. 6, p. 2240-2247, 2004.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2ª Ed. Lavras, UFLA, 2006. 729p.

MULVANEY, R.L., KHAN S.A.; ELLSWORTH, T.R. Need for a soil-based approach in managing nitrogen fertilizers for profitable corn production. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, 70:172–182, 2006.

NEWMAN, A.C.D.; HAYES, M.H.B. Some properties of clays and of other soil colloids and their influences on soils. In: De Boodt, M. F., Hayes, M. H. B. and Herbillon, A. (eds.) **Soil colloids and their associations in aggregates**. Plenum Press. Pp. 39-55, 1990.

OLIVEIRA, S.A. Avaliação da disponibilidade de nitrogênio do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.24, p.131-148, 1989.

PARFITT, R.L. et al. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. **Geoderma**. Amsterdam, v.75, p.1-12, 1997.

PARENTONI, S. N.; FRANÇA, G. E.; BAHIA FILHO, A. F. C. Avaliação dos conceitos de quantidade e intensidade de mineralização de nitrogênio para trinta solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.12, p. 225-229, 1988.

PENG, S. et al. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. **Agronomy Journal**. Madison, v.85, n.5, p.987-990, 1993.

PILLON, C.N. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo, induzidas por sistemas de cultura em plantio direto**, 2000. 232p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2000.

POCOJESKI, E. et al. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores. **Ciência Rural**. Online, 2012.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**. Amsterdam, v.24, p.29-96. 1972.

PÖTTKER, D.; TEDESCO, M.J. Efeito do tipo e tempo de incubação sobre a mineralização da matéria orgânica e nitrogênio total em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.3, n. 1, p.20-24, 1979.

REICHMANN SOBRINHO, E. **Seleção de métodos de laboratório para avaliação do nitrogênio orgânico do solo potencialmente disponível para as plantas**. 1989. 107p. Dissertação – (Mestrado em Solos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. 1989.

RHODEN, A., C. **Potencial de mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 2005, 108 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

RHODEN, A.C. et al. Mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**. Santa Maria, 36:1780-1787, 2006a.

RHODEN, A.C. et al. Relação entre características de solos de várzea e a absorção de nitrogênio pelo arroz irrigado em dois cultivos sucessivos em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 3, p. 325-331, jul-set, 2006b.

ROBERTS, T.L. et al. Direct steam distillation as an alternative to the Illinois Soil Nitrogen Test. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 73, p.1268–1275, 2009a.

ROBERTS, T.L. et al. Changes in alkaline hydrolyzable nitrogen distribution with soil depth: Fertilizer correlation and calibration implications. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, 73:2151–2158, 2009b.

ROBERTS, T.L. et al. N-ST*R: A soil-based nitrogen test for fertilizer recommendations in Arkansas rice production. *In*: R.J. NORMAN; MOLDENHAUER, K.A.K. editors, B.R. **Wells Rice Research Studies 2009**. Res. Ser. 581. Univ. of Arkansas, Agric. Exp. Stn., Fayetteville, p. 190–196, 2010.

ROBERTS, T.L. et al. Predicting nitrogen fertilizer needs for rice in Arkansas using alkaline hydrolyzable-nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 75. P. 1161–1171, 2011.

ROBERTS, T.L. et al. Soil depth coupled with soil nitrogen and carbon can improve fertilization of rice in Arkansas. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 76, 2012.

ROSA, C.M. **Matéria orgânica em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil**. 2010, 92p. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.

ROSCOE, R. et al. Soil organic matter dynamics in density and particle-size fractions as revealed by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio in a cerrado's oxisol. **Geoderma**. Amsterdam, v.104, p.182-202, 2001.

SANTOS, V.B. **Matéria Orgânica e Biomassa Microbiana de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo**. 2003. 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solos) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, 2003.

SCIVITTARO, W.B.; MACHADO, M.O. Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado. *In*: GOMES, A. da S., MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de (Org). **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas – RS: Sistemas de Produção 03, 2004.

SCIVITTARO, W.B., SCHAFER, G.; GOMES, A. da S. Uso de indicadores do nível de nitrogênio na planta de arroz para predição da necessidade de adubação nitrogenada na diferenciação da panícula. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26; 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2005, p.477-479.

SHARIFI, M. et al. Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, 71:1233-1239, 2007.

SILVA, C. A.; VALE, F. R.; GUILHERME, R.L.G. Efeito da calagem na mineralização do nitrogênio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.18,p. 471-476, 1994.

SILVA, L.S. et al. Resposta a doses de nitrogênio e avaliação do estado nutricional do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 189-194, 2007.

SILVA, L.S. et al. Leitura crítica do clorofilômetro para manejo da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.14, n 4-4, p.125-127, 2008.

SKJEMSTAD, J.O. et al. High energy ultraviolet photooxidation: a novel technique for studying physically protected organic matter in clay and silt-sized aggregates. **Journal of Soil Science**. London, v.44, p. 485-499, 1993.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil / XXX **Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**, 06 a 08 de agosto de 2014, Bento Gonçalves, RS. – Santa Maria: SOSBAI, 2014. 192 p.

SOUSA, R.O. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. 2001. 164f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2001.

SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. Solos alagados. In: Meurer, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000, p. 126-149.

SOUSA, R.O.; BORTOLLON, L. Crescimento radicular e da parte aérea do arroz (*Oryza sativa* L.) e absorção de nutrientes, em solução nutritiva com diferentes concentrações de ácido acético. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.8, n.3, p. 231-235, 2002.

SOUSA, R.O; PERALBA, M.C.R.; MEURER, E.J. Short chain organic acid dynamics in solution of flooded soil treated with ryegrass residues. **Communications in soil science and plant analysis**. Athens, v.33, p.779- 787, 2002.

SOUSA, R.O.; VAHL, L.C.; OTERO, X.L. Química de solo alagado. In: MELO, V. DE F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e Mineralogia do Solo. Parte II – Aplicações**. Viçosa, MG, 2009. p. 485-528.

SPARGO, J.T. et al. Illinois soil nitrogen test for prediction of fertilizer nitrogen needs of corn in Virginia. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 73, p.434–442, 2009.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 277p.

STANFORD, G. Assessment of soil nitrogen availability. In: STEVENSON, F.J. (Ed.) **Nitrogen in agricultural soils**. Madison, ASA, CSSA, SSSA. 1982. p.651- 688.

STANFORD, G.; SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potential of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 36, p. 465-472, 1972.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soils: Carbon, nitrogen, phosphorous, sulfur, micronutrients**. Second ed. John Wiley & Sons, New York, 1999.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TEDESCO, J.M. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995. 174 p.

THICKE, F. E. et al. Soil nitrogen mineralization indexes and corn response in crop rotations. **Soil Science**. Baltimore, v. 156, n.5, p. 322-335, 1993.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, London, v.33, p. 141-163, 1982.

TURNER, F.T.; JUND, M.F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requeriment for semidwarf rice. **Agronomy Journal**. Madison, v.83, n.5, p.926-928, 1991.

VAHL, L.C. Fertilidade de solos de várzea. In: GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A. (eds.) **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 119-162.

VAZOLLER, R.F.; DAMIANOVIC, M.H.R.Z; ARAUJO, J.C. Biodegradação anaeróbia. In: MELLO, I.S.; AZEVEDO, J.L. (Eds.). **Microbiologia Ambiental**. Jaguariúna: Embrapa, 2008. p.217-260.

WANG, W. et al. Evaluating chemical and physical indices of nitrogen mineralization capacity with an unequivocal reference. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 65, p. 368–376, 2001.

WILLIAMS, J. D. et al. Amino sugar nitrogen test to predict nitrogen fertilizer rates in corn. **Agronomy Abstracts**, ASA-CSSA-SSSA, Madison, 2005. CD-ROM.

WILLIAMS, J.D. et al. Comparison of soil nitrogen tests for corn fertilizer recommendations in the humid southeastern USA. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 71, p. 171–180, 2007.

WILSON JR., C.E.; WELLS, B.R.; NORMAN, R.J. Fertilizer nitrogen uptake by rice from urea–ammonium nitrate solution vs. granular urea. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 58, p. 1825–1828, 1994.

WILSON JR., C.E. et al. Efficient use of fertilizer. In Slaton N.A. (ed.) **Rice production handbook**. Misc. Publ. 192. Univ. of Arkansas Coop. Ext. Serv. Little Rock, AR. 2001, p. 51–74.

WISEMAN, C.L.S.; PÜTTMANN, W. Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter. **Geoderma**. Amsterdam, v.134, p.109-118, 2005.

ZECH, W. et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**. Amsterdam, 79:117-161, 1997.

ZHU, Z. et al. Nitrogen mineralization of paddy soils in Tai-lake region and the prediction of soil nitrogen supply. **Acta Pedologia Sinica**, Beijing, v. 21, n. 1, p. 29-36, 1984.

ANEXOS

ANEXO A – Valores N acumulado na parte aérea (P.A.) das plantas de arroz, N mineral (N-NH₄⁺ + NO₃⁻) ao longo de 77 dias de incubação anaeróbica e correlação linear de Pearson (r).

SOLO	N acum. P.A.	DIAS DE INCUBAÇÃO						
		0	7	14	21	28	42	77
	 mg N kg ⁻¹						
1	29,2	20,4	55,7	55,7	83,0	98,5	96,1	100,9
2	21,3	50,6	45,7	45,0	66,9	85,4	83,9	99,1
3	24,8	28,0	46,6	40,3	70,0	89,0	82,1	104,4
4	28,5	20,8	61,8	59,2	88,2	103,9	96,2	107,0
5	32,1	26,3	49,2	57,4	68,7	93,0	97,8	105,2
6	22,7	18,2	20,9	27,7	56,7	63,1	73,3	85,2
7	25,7	23,7	42,8	44,4	70,1	88,3	87,2	96,5
8	23,7	11,2	52,9	41,3	71,0	88,0	83,2	95,4
9	75,7	33,0	75,8	72,0	105,2	122,9	131,7	136,3
10	43,6	22,5	58,8	71,9	91,2	105,3	100,1	110,0
11	67,2	29,7	72,9	83,1	106,7	120,9	109,4	125,0
12	40,6	21,6	64,3	75,5	97,1	111,3	106,0	117,9
13	40,6	22,0	71,4	73,1	94,4	112,4	104,6	113,7
14	36,9	29,2	38,6	65,4	90,3	107,4	100,4	123,9
15	27,7	21,7	64,0	65,4	80,6	99,7	96,2	116,9
16	50,7	25,1	76,3	78,8	102,9	119,3	107,4	114,9
17	67,4	42,0	83,1	83,9	112,8	132,5	121,5	139,2
18	70,8	31,3	85,4	85,4	114,5	128,2	117,9	130,5
19	58,6	20,8	74,3	76,5	101,8	119,4	109,0	134,6
20	19,3	18,9	32,5	34,9	58,6	77,7	83,7	84,2
21	40,7	24,5	70,2	78,7	103,1	116,3	111,4	128,0
22	28,9	27,5	42,5	54,8	83,5	77,3	64,3	66,9
23	41,1	28,0	66,8	76,2	107,0	121,3	111,9	130,5
24	44,8	23,8	79,5	75,8	109,9	122,2	112,6	121,2
25	93,6	39,0	97,9	99,8	124,5	140,7	124,5	144,6
26	61,4	34,7	61,4	52,8	85,7	108,2	100,5	123,9
27	63,7	26,4	72,6	74,7	107,4	123,9	117,3	144,5
28	139,1	43,9	110,3	126,7	140,9	166,6	138,0	173,1
29	29,7	29,6	35,6	50,3	75,8	100,4	101,2	119,5
30	65,7	23,8	83,3	90,5	117,5	138,3	127,1	144,0
31	91,6	35,5	96,3	97,8	130,7	150,5	130,8	152,8
32	63,1	43,1	81,4	81,8	121,8	137,9	119,6	144,9
r	-	0,55	0,86	0,88	0,87	0,89	0,84	0,86