

Alexandre Dias Dutra

Adubação nitrogenada via fertirrigação em arroz irrigado por aspersão

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Luís Carlos Timm

Co-orientadores: Lessandro Coll Faria e Walkyria Bueno Scivittaro

Pelotas, 2016

Alexandre Dias Dutra

Adução nitrogenada via fertirrigação em arroz irrigado por aspersão

Tese de doutorado, apresentada para obtenção do grau de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25 de Julho de 2016

U6

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Antônio Saldanha Louzada

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl

Doutor em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dr. José Maria Barbat Parfitt

Doutor em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas

Catálogo na fonte

Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

D978a Dutra, Alexandre Dias

Adubação nitrogenada via fertirrigação em arroz irrigado por aspersão / Alexandre Dias Dutra; Luís Carlos Timm, orientador ; Lessandro Coll Faria e Walkyria Bueno Scivittaro, coorientadores. — Pelotas, 2016

145 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. : *Oriza sativa* L.. 2. Nitrogênio. 3. Manejo. 4. Ureia. 5. Quimificação I.Timm, Luís Carlos II.Título.

CDD : 633.18

Dedico este trabalho aos meus pais: Ângela Dias Dutra e
Clênio Alcides Dutra (in memoriam)

Agradecimentos

A todos aqueles que contribuíram para que fosse possível a realização desse trabalho, desde o pessoal que juntamente comigo escreveu o projeto para a aquisição de recursos juntamente ao CNPQ até as inúmeras pessoas que me ajudaram e me deram apoio no campo.

Ao comitê de orientação Prof. Dr. Luís Carlos Timm, Prof. Dr. Lessandro Coll Faria e Dr^a. Walkyria Bueno Scivittaro, pelo apoio e ajuda em todas as etapas de construção desse trabalho e pelo conhecimento a mim transmitido.

Aos estagiários e amigos Jordano, Rafael e Jeferson, pela dedicação e “madrugadas” para a realização das fertirrigações.

Ao pessoal da Embrapa Terras baixas pelo apoio com a estrutura que possibilitou a realização do trabalho e em especial aos colaboradores do seleiro, principalmente Mikael e o Moacir pela ajuda e dedicação de obter o necessário para que fossem realizadas as atividades a tempo e hora, para a obtenção dos presentes resultados. Pelas “madrugadas” para a realização dos testes de uniformidade e fertirrigação da lavoura.

Ao pessoal da Embrapa Clima Temperado, Laboratório de nutrição vegetal, Edite, Adão e Cristina, pela dedicação e paciência para com os meus dados e Laboratório de fertilidade do solo, Denoir, Paulinho e Marla pela realização das análises a apoio nas coletas.

A todos os meus colegas, pelo ajuda nas atividades e pelo apoio moral e às vezes até financeiro ao longo desses anos em todos os momentos dessa caminhada.

Ao grande amigo Jean Carlo Carvalho, que por incentivo dele eu entrei para a Pós-graduação na Universidade do Recôncavo Baiano.

Às vezes, quando olhamos para trás vimos apenas os últimos degraus da escada e nos esquecemos da base...

...o meu muito obrigado à pessoa que deu o “start” no meu conhecimento, que me ensinou e ler e a escrever, a minha alfabetizadora Maria Helena Bueno.

Resumo

DUTRA, Alexandre Dias. **Adubação nitrogenada via fertirrigação em arroz irrigado por aspersão**. 2016. 145 f. Tese de doutorado - (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

O manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado por aspersão no Brasil é um assunto relativamente recente e os resultados de pesquisa ainda são muito escassos. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a resposta do arroz irrigado por aspersão à adubação nitrogenada em cobertura, aplicada via água de irrigação, visando o estabelecimento do manejo da adubação para esse sistema de produção. O estudo foi realizado com a cultivar de arroz irrigado BRS Pampa, em Planossolo Háplico, na Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, Rio Grande do Sul. Foram conduzidos três experimentos nas safras 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015. Para o manejo da irrigação, instalaram-se, a 10 cm de profundidade, sete sensores de tensão de água no solo *Watermark* e um sensor de temperatura conectado a um datalogger. O manejo de irrigação adotado baseou-se na tensão de água no solo de 20 kPa, na safra 2012/2013, e de 10 kPa, nas demais safras. Na primeira safra, avaliaram-se manejos do nitrogênio (N) para o arroz irrigado por aspersão, incluindo variações na dose (0, 40, 80, 120, 160 e 200 kg ha⁻¹), no parcelamento e na época de aplicação do nutriente. Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. Avaliou-se o nível de N na planta, a produtividade de grãos, componentes de produtividade e a acumulação de N na parte aérea das plantas de arroz. Nas safras 2013/2014 e 2014/2015, validaram-se, utilizando-se a técnica de fertirrigação, os tratamentos mais contrastantes e com resultados promissores da safra 2012/2013. Os tratamentos selecionados foram dispostos em delineamento de faixas, com sete repetições. Um extrator de solução foi instalado junto a cada sensor *Watermark*, para o acompanhamento das concentrações de nitrato e amônio na solução do solo. O efeito dos tratamentos foi avaliado pelo nível de N na planta, pela produtividade de grãos, pela eficiência de utilização do fertilizante e pelas marchas de acumulação de matéria seca e de N na parte aérea da planta. Conclui-se que: i) a adubação nitrogenada via fertirrigação, por permitir maior parcelamento do nitrogênio, aumenta a produtividade de grãos do arroz irrigado por aspersão, comparativamente à adubação convencional via solo, quando o manejo de irrigação é baseado na tensão de água no solo de 10 kPa; ii) em cultivo de arroz irrigado por aspersão, o uso da técnica de fertirrigação para a aplicação de nitrogênio, parcelado em seis aplicações, proporciona maior eficiência agrônômica do nutriente em relação ao manejo convencional, onde a cobertura nitrogenada foi parcelada em duas aplicações via solo; e iii) no cultivo de arroz irrigado por aspersão, a dose de máxima eficiência econômica do nitrogênio corresponde a 100 kg ha⁻¹, quando aplicado em cobertura, via fertirrigação, parcelado em seis aplicações.

Palavras-chave: *Oriza sativa* L., nitrogênio, manejo, ureia, quimigação.

Abstract

DUTRA, Alexandre Dias. **Nitrogen fertilization through fertigation in rice sprinkler irrigation**. 2016. 145 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

Topdressing nitrogen fertilization through sprinkler irrigated rice in Brazil is a relatively new subject and results are still very scarce. This study had the objective of evaluating the response of sprinkler irrigated rice to topdressing nitrogen fertilization, applied through irrigation water, aiming the establishment of the management for this production system. The study was carried out with BRS Pampa irrigated rice cultivar in a Typic Albaqualf at Embrapa Clima Temperado, situated in the city of Capão do Leão, Rio Grande do Sul state, Brazil. Three experiments were conducted in 2012/2013, 2013/2014 and 2014/2015 harvest seasons. For the irrigation management, seven Watermark soil water sensors and a temperature sensor, connected to a datalogger, were installed in the soil depth of 10 cm. The adopted irrigation management was based on the value of 20 kPa of soil water tension, for the 2012/2013 harvest season and 10 kPa, for the other two harvest seasons. In the 2012/2013 harvest season, nitrogen (N) management evaluated for sprinkler irrigated rice, included variations in doses of N (treatments of 0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg ha⁻¹), in fractioning of N and in N application time. The treatments were arranged in the design of randomized blocks with four replications. The level of N in the plant, grain yield, yield components and the N accumulation in the shoots of the rice were evaluated in each treatment. The more contrasting N treatments of the 2012/2013 harvest season were validated in the 2013/2014 and 2014/2015 harvest seasons using the fertigation technique. The selected treatments were arranged in a strip design with seven replicates. A soil solution extractor was installed close to each soil water tension sensor for monitoring nitrate and ammonium concentrations in soil solution. The effect of treatments in 2013/2014 and 2014/2015 harvest seasons was assessed by measuring the level of N in the plant, the grain yield, the efficiency of the use of N fertilizer by rice crop, and by the march of accumulation of dry matter and N in the shoots of the plant. It was concluded that: i) the nitrogen fertigation, by allowing higher parceling of nitrogen, increases the grain yield of sprinkler irrigated rice compared to the conventional N fertilization applied in the soil, when the irrigation management is based on the soil water tension of 10 kPa; ii) in the sprinkler irrigated rice, the nitrogen application by the fertigation technique, parceled on six applications, provides higher agronomic efficiency of N as compared to the conventional fertilization management, where the N topdressing was parceled on two applications into the soil; iii) in the cultivation of sprinkler irrigated rice, the N rate of 100 kg ha⁻¹ is of maximum economical efficiency, when applied by fertigation in topdressing and parceled on six applications.

Key-words: *Oriza sativa* L., nitrogen, management, urea, chemigation.

Lista de Figuras

Figura 1	Imagem aérea da área experimental na safra agrícola 2014/2015. Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS.....	41
Figura 2	Vista de sensor de tensão de água no solo do tipo <i>Watermark</i> (A) e de datalogger (B) instalados na área experimental.....	46
Figura 3	Lâminas médias coletadas na avaliação do sistema de irrigação.....	58
Figura 4	Lâminas médias coletadas na avaliação do sistema de irrigação no segundo vão e no terceiro vão.....	59
Figura 5	Distribuição temporal da precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura do arroz irrigado por aspersão nas safras de 2012/13 (a), 2013/14 (b) e 2014/15 (c).....	61
Figura 6	Teor de nitrogênio na folha índice do arroz dos tratamentos referência e com aplicação de doses de nitrogênio em cobertura via fertirrigação manual. Avaliação realizada em R1.....	66
Figura 7	Índice relativo de clorofila (IRC) na folha bandeira do arroz, na floração plena, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	67
Figura 8	Teor de nitrogênio na folha índice do arroz, na floração plena, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	67
Figura 9	Produtividade de grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	70
Figura 10	Esterilidade de espiguetas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	71
Figura 11	Massa de matéria seca dos colmos e folhas (MSCF) do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	73
Figura 12	Massa de matéria seca das panículas com grãos (MSPG) do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	73

Figura 13	Massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	74
Figura14	Nitrogênio acumulado em colmos e folhas de plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	75
Figura 15	Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	75
Figura 16	Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual.....	76
Figura 17	Planta de arroz aberta em duas seções longitudinais, ilustrando o estágio de diferenciação da panícula (R1), quando foi realizada a 5ª aplicação de nitrogênio, via água de irrigação.....	77
Figura 18	Índice relativo de clorofila (IRC) na folha índice do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Avaliação realizada no estágio de sete a oito folhas (V7-V8).....	80
Figura 19	Teor de nitrogênio na folha índice do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Avaliação realizada no estágio de sete a oito folhas (V7-V8).....	80
Figura 20	Índice relativo de clorofila (IRC) na folha bandeira do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Avaliação realizada na floração plena (estádio R4).....	81
Figura 21	Estatura de plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	83
Figura 22	Produtividade de grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	84
Figura 23	Número de espiguetas por panícula de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	85

Figura 24	Peso de 1000 grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	86
Figura 25	Produção de matéria seca dos colmos e folhas (MSCF), em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	87
Figura 26	Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz (MSPA), em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	88
Figura 27	Índice relativo de clorofila (IRC) na folha índice do arroz, no estágio V7-V8, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	95
Figura 28	Teor de nitrogênio na folha índice do arroz, no estágio V7-V8, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	96
Figura 29	Índice relativo de clorofila (IRC) na folha bandeira do arroz, na floração plena, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	96
Figura 30	Estatuta de plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	99
Figura 31	Número de perfilhos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	99
Figura 32	Produtividade de grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	100
Figura 33	Esterilidade de espiguetas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	101
Figura 34	Peso de 1000 grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	102
Figura 35	Rendimento de grãos inteiros de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	102
Figura 36	Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas (PAP) de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação.....	104

Figura 37	Valores mensurados e estimados para a massa seca da parte aérea da planta (MPAP) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPAP) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão no tratamento T1 (omissão de adubação nitrogenada em cobertura).....	107
Figura 38	Valores mensurados e estimados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão no tratamento referência - 120 kg ha ⁻¹ (parcelados 70 kgha ⁻¹ de N em V4 e 50 kg ha ⁻¹ de N em R0).....	107
Figura 39	Valores mensurados e estimados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T2 (80 kg ha ⁻¹ , parcelados em quatro aplicações, entre os estádios V4 e R1).....	108
Figura 40	Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T2 (80 kg ha ⁻¹ , parcelados em quatro aplicações, entre os estádios V4 e R1).....	128
Figura 41	Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T4 (160 kg ha ⁻¹ , parcelados em seis aplicações, entre os estádios V4 e R4).....	128

Figura 42 Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T5 (200 kg ha⁻¹, parcelados em seis aplicações, entre os estádios V4 e R4)..... 129

Lista de Tabelas

Tabela 1	Composição de fertilizantes nitrogenados solúveis.....	37
Tabela 2	Atributos físicos do solo da área experimental.....	42
Tabela 3	Resultados da análise química do solo da área experimental por ocasião da instalação dos experimentos 1, 2 e 3.....	43
Tabela 4	Descrição dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado (Safrá 2012/2013).....	48
Tabela 5	Descrição dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado por aspersão avaliados na safra 2013/2014.....	52
Tabela 6	Descrição dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado por aspersão avaliados na safra 2014/2015.....	52
Tabela 7	Datas e estádios de desenvolvimento das plantas de arroz por ocasião das coletas para estabelecimento da marcha de acumulação de matéria seca e absorção de nitrogênio.....	56
Tabela 8	Lâmina total de irrigação para cada período do ciclo da cultura do arroz, para as safras 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015.....	60
Tabela 9	Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação manual, frente ao tratamento referência com aplicação do nutriente via solo, safra 2012/2013.....	63
Tabela 10	Número de perfilhos e de panículas e peso de 1000 grãos de arroz, em função do parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, via fertirrigação manual.....	69
Tabela 11	Datas e estádios das adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz.....	77
Tabela 12	Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, com aplicação do nutriente via solo; Safra 2013/2014.....	78

Tabela 13	Recuperação aparente de nitrogênio (RAN), eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) e eficiência fisiológica de uso do nitrogênio (EFUN) das plantas de arroz.....	89
Tabela 14	Teor de amônio (NH_4^+) na solução do solo de área cultivada com arroz irrigado por aspersão, em função do manejo da adubação nitrogenada.....	90
Tabela 15	Teor de nitrato (NO_3^-) na solução do solo de área cultivada com arroz irrigado por aspersão, em função do manejo da adubação nitrogenada. Avaliações realizadas em quatro épocas.....	92
Tabela 16	Datas e estádios das coletas de um metro linear do arroz irrigado por aspersão.....	92
Tabela 17	Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, com aplicação do nutriente via solo; Safra 2014/2015.....	94
Tabela 18	Recuperação aparente de nitrogênio (RAN), eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) e eficiência fisiológica do uso do nitrogênio (EFUN).....	104
Tabela 19	Parâmetros das equações 7 e 8 e os respectivos coeficientes de determinação para os seis tratamentos avaliados.....	106
Tabela 20	Concentração de amônio (NH_4^+ - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), na solução do solo, \approx 12 h após as fertirrigações.....	110
Tabela 21	Concentração de nitrato (NO_3^- - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), na solução do solo, \approx 12h após as fertirrigações.....	110
Tabela 22	Resumo com os principais resultados dos três experimentos.....	115

Lista de Equações

Equação 1	Coeficiente de uniformidade de Christansen, %.....	44
Equação 2	Máxima eficiência econômica da adubação (kg ha^{-1}).....	54
Equação 3	Total de nitrogênio absorvido pelas plantas de arroz.....	54
Equação 4	Recuperação aparente do Nitrogênio (%).....	54
Equação 5	Eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (kg kg^{-1}).....	55
Equação 6	Eficiência fisiológica do uso do nitrogênio (kg kg^{-1}).....	55
Equação 7	Estimativa da massa seca da parte aérea da planta de arroz em função do tempo (kg ha^{-1}).....	56
Equação 8	Estimativa do nitrogênio acumulado na parte aérea da planta de arroz em função do tempo (kg ha^{-1}).....	56
Equação 9	Coeficiente de determinação (R^2).....	57

Lista de Reações

Reação 1	Aminação.....	32
Reação 2	Amonificação.....	32
Reação 3	Nitritação.....	33
Reação 4	Nitratação.....	34
Reação 5	Passos da desnitrificação.....	35

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 HIPÓTESES.....	22
3 OBJETIVOS.....	23
3.1 Objetivo geral.....	23
3.2 Objetivos específicos.....	23
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	24
4.1 A cultura do arroz.....	24
4.2 A irrigação na cultura do arroz.....	25
4.3 Fertirrigação.....	27
4.4 Uniformidade de aplicação de água e de fertilizante.....	29
4.5 Formas de nitrogênio.....	30
4.6 Nitrogênio no solo.....	30
4.6.1 Nitrogênio orgânico.....	31
4.6.2 Nitrogênio mineral.....	32
4.6.3 Nitrificação.....	33
4.6.4 Desnitrificação.....	34
4.7 O nitrogênio na solução do solo e sua absorção pelas plantas.....	35
4.8 Fontes de nitrogênio utilizadas como fertilizantes na agricultura.....	36
4.9 Eficiência de fertilizantes nitrogenados.....	37
4.10 Recomendação e formas convencionais de aplicação de nitrogênio na cultura do arroz.....	39
4.11 Recuperação de nitrogênio na cultura do arroz.....	40
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
5.1 Caracterização da área experimental.....	42
5.2 Avaliação do sistema de irrigação e de fertirrigação.....	44
5.3 Experimento 1. Manejo do nitrogênio para o arroz irrigado por aspersão.....	45
5.3.1 Disposição das parcelas experimentais, implantação e condução da cultura do arroz.....	45
5.3.2 Manejo da irrigação para arroz e monitoramento da solução do solo.....	46

5.4.3	Tratamentos e delineamentos experimentais.....	46
5.3.4	Variáveis mensuradas e análise estatística.....	48
5.4	Experimento 2. Manejo da adubação nitrogenada em cobertura, via fertirrigação mecanizada, para o arroz.....	49
5.4.1	Disposição das parcelas experimentais, implantação e condução da cultura do arroz.....	49
5.4.2	Manejo da irrigação e monitoramento de formas minerais de nitrogênio na solução do solo.....	50
5.4.3	Tratamentos e delineamentos experimentais.....	51
5.4.4	Variáveis mensuradas.....	53
5.4.5	Análise estatística.....	57
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
6.1	Uniformidade de aplicação de água e variáveis climatológicas.....	58
6.2	Experimento 1 – Safra 2012/2013.....	62
6.2.1	Níveis de nitrogênio na planta.....	65
6.2.2	Desempenho agrônômico e produtivo do arroz.....	68
6.2.3	Acumulação de matéria seca e de nitrogênio na planta de arroz.....	72
6.3	Experimento 2 – Safra 2013/2014.....	76
6.3.1	Níveis de nitrogênio na planta.....	79
6.3.2	Desempenho agrônômico e produtivo do arroz.....	82
6.3.3	Acumulação de matéria seca e de nitrogênio na planta de arroz.....	86
6.3.4	Eficiência no uso do nitrogênio pela planta de arroz.....	88
6.3.5	Concentração de amônio e nitrato na solução do solo.....	90
6.4	Experimento 2 – Safra 2014/2015.....	92
6.4.1	Níveis de nitrogênio na planta.....	95
6.4.2	Desempenho agrônômico e produtivo do arroz.....	97
6.4.3	Acumulação de matéria seca e de nitrogênio na planta de arroz.....	103
6.4.4	Eficiência do uso do nitrogênio pela planta de arroz.....	104
6.4.5	Marcha de absorção de nitrogênio pelas plantas de arroz.....	105
6.4.6	Concentração de nitrato e amônio na solução do solo.....	109
7	CONCLUSÕES.....	111
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
	REFERÊNCIAS.....	116

Apêndices.....	127
----------------	-----

1 INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) produz aproximadamente 69% do arroz consumido no País. A produção de arroz é uma das principais atividades agrícolas que movimenta a economia do Estado (CONAB, 2015).

O sistema de irrigação usualmente adotado nas lavouras gaúchas é o de inundação contínua, o que exige o uso de grande quantidade de água, sendo atualmente necessários uma média de cerca de 1 m³ de água para produzir 1 kg de grãos de arroz (MARCOLIN et al., 2009). Esse volume hídrico, utilizado nesse sistema de irrigação, é duas ou três vezes maior do que o utilizado para a produção da mesma quantidade de outros cereais, como o trigo ou o milho (ZHANG et al., 2012). Além disso, o cultivo de arroz irrigado por inundação pode promover degradação qualitativa dos recursos hídricos, por meio da deposição de materiais orgânicos, inorgânicos e minerais dissolvidos na água de drenagem à jusante da lavoura. Em decorrência, o setor arrozeiro tem sido pressionado pela sociedade no sentido de diminuir a demanda hídrica.

Nesse sentido, pesquisadores e produtores vêm trabalhando nos últimos anos, com sucesso, no desenvolvimento de tecnologias para sistemas de produção de arroz mais sustentáveis e que proporcionem menor impacto ambiental negativo. Dentre essas destaca-se a substituição do método de irrigação de superfície (inundação contínua) pelo de aspersão, que além de garantir níveis de produtividade compatíveis, tem propiciado uma economia de água de aproximadamente 50% à cultura (PARFITT et al., 2011). A adoção da irrigação por aspersão na produção de arroz requer fortes mudanças em vários aspectos tecnológicos do cultivo do arroz, entre os quais destacam-se a necessidade de indicação de cultivares mais adaptadas ao sistema, bem como a adequação de práticas de manejo, como o fitossanitário e a fertilização.

Especificamente quanto ao manejo da fertilização, a adoção do sistema de irrigação por aspersão possibilita que a aplicação de nutrientes seja feita via água de irrigação, ou seja, utilizando-se a técnica de fertirrigação (PAPADOPOULOS, 1999). A fertirrigação difere da adubação via solo, principalmente por tornar mais eficiente a absorção dos nutrientes pelas raízes das plantas, pois os nutrientes já se encontram dissolvidos.

No cultivo de arroz irrigado, a técnica de fertirrigação é particularmente interessante para a aplicação de nitrogênio, visto se tratar do nutriente requerido em maior quantidade pelo arroz irrigado e que proporciona os maiores retornos em produtividade (SILVA et al., 2007), mas que apresenta baixa eficiência agrônômica (raramente superior a 50%) e bastante variável (STEVENS et al., 2008). Este comportamento se deve à complexa interação de fatores que determinam o aproveitamento do nitrogênio pelo arroz, em especial as condições climáticas, o manejo da irrigação e do próprio fertilizante (FAGERIA et al., 2011).

Em razão da baixa eficiência agrônômica, o manejo da adubação nitrogenada é um dos aspectos mais intensivamente estudados na cultura de arroz irrigado. Os estudos concentram-se, porém, no sistema irrigado por inundação do solo, onde a fonte usualmente utilizada é a ureia (45% de N). O manejo atualmente preconizado consiste em aplicar uma pequena fração da dose de N recomendada na semeadura (10% a 15%) e o restante, em cobertura, parcelado entre o início do perfilhamento (cerca de 60% da dose recomendada), em solo seco antecedendo a entrada de água na lavoura, e na iniciação da panícula, quando a aplicação normalmente é feita via aérea, sobre uma lâmina de água não circulante (SOSBAI, 2014).

O manejo descrito foi estabelecido de forma a otimizar a eficiência de utilização do nutriente em lavouras irrigadas por inundação contínua, sem onerar demasiadamente o custo de produção por repetidas aplicações. Porém, no sistema irrigado por aspersão, há a possibilidade de maior fracionamento da aplicação, via água de irrigação (RHINE et al., 2011), não implicando em aumento no custo de produção. Tal prática concorre, ainda, para o maior aproveitamento de nitrogênio pela planta e redução de perdas. Isto porque a condição aeróbica, vigente na maior parte do tempo em lavouras irrigadas por aspersão, interfere na dinâmica de microrganismos e do nitrogênio no solo (CANTARELA, 2007), possibilitando a conversão do nitrogênio amoniacal à forma nítrica, que fica sujeita à desnitrificação (RHINE et al., 2011; STEVENS et al., 2012).

Por ser um sistema relativamente recente, as informações de pesquisa sobre manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado por aspersão ainda são muito restritas. O primeiro trabalho específico sobre o tema foi publicado recentemente por um grupo de pesquisadores da Universidade de Missouri (EUA) (RHINE et al., 2011), que ao trabalharem, por três anos, com duas cultivares e um híbrido de arroz irrigado por aspersão, em sistema pivô-central, determinaram doses de máxima eficiência econômica variando entre 124 e 168 kg/ha de N. Estabeleceram, ainda, como manejo para o nutriente, o parcelamento da dose em uma aplicação de ureia (25% da dose) em solo seco, no início do perfilhamento, seguida de cinco aplicações semanais consecutivas do fertilizante nitrogenado líquido URAN (32% de N), aplicado via fertirrigação.

Devido à crescente relevância do sistema de irrigação por aspersão para algumas regiões arrozeiras do Rio Grande do Sul e a carência de informações de pesquisa que subsidiem o estabelecimento de manejo da adubação nitrogenada para esse novo sistema de produção, justifica-se o presente trabalho.

2 HIPÓTESES

A fertirrigação nitrogenada na cultura do arroz irrigado por aspersão favorece o desempenho produtivo e proporciona maior eficiência de utilização do nutriente pela cultura, relativamente à aplicação via solo.

O maior fracionamento da adubação nitrogenada via fertirrigação mecanizada, nas fases vegetativa e reprodutiva do arroz irrigado por aspersão, beneficia o desempenho agrônômico e produtivo do arroz em comparação ao manejo da adubação via solo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Determinar a resposta do arroz irrigado por aspersão à adubação nitrogenada em cobertura, aplicada via água de irrigação.

3.2 Objetivos específicos

✓ Estabelecer parcelamento e épocas de adubação nitrogenada via água de irrigação, para o arroz irrigado por aspersão.

✓ Comparar o efeito da adubação nitrogenada em cobertura aplicada via solo e via água de irrigação sobre o nível de nitrogênio da planta, desempenho produtivo e eficiência de utilização do nutriente pela cultura.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 A cultura do arroz

A cultura do arroz teve origem na Ásia e as primeiras coletas de mudas silvestres para o transplântio em um 'cultivo controlado' e domesticação do arroz selvagem ocorreram na China há aproximadamente 9.000 anos (MOLINA et al., 2011). Estudos genéticos de DNA mostraram que as três espécies de arroz cultivadas na atualidade em larga escala, *Oryza Sativa*, *Oryza Indica* e *Oryza Glaberrima* originaram-se a partir de adaptações de arroz selvagem, o *Oryza rufipogon* (HUANG et al., 2012).

Farooq et al. (2011) descrevem que, a partir de 1950, os Países desenvolvidos começaram a substituir o transplântio em solo alagado pela semeadura em solo seco, o que reduziu o uso de água, possibilitando o cultivo de área maior, com menor quantidade de mão de obra e em menor espaço de tempo. Porém, na maior parte da Ásia, onde ocorre a maior produção mundial do cereal, ainda é adotado o sistema de transplântio de mudas. Rao et al. (2007) descrevem que apenas 23% do arroz produzido no mundo é cultivado por meio do sistema de semeadura em solo seco.

Segundo a FAOSTAT (2012), o arroz é a *commodity* com a terceira maior produção mundial, ficando apenas atrás da cana-de-açúcar e do milho. Todavia, como grande parte da produção de milho não é destinada ao consumo humano, o arroz é o cereal mais importante no que diz respeito à nutrição humana e ingestão calórica, fornecendo mais de um quinto das calorias consumidas por humanos em todo o mundo (HUANG et al., 2012).

O Brasil é o décimo maior produtor de arroz do mundo, com uma produção de 11,7 milhões de toneladas na safra 2012/2013 (FAOSTAT, 2013). No Brasil, o cereal

respondeu por 6% do total de grãos produzidos na safra 2014/2015, sendo o terceiro grão mais produzido (CONAB, 2015).

Os estados do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC) destacam-se no cenário nacional por serem os principais produtores do cereal (CONAB, 2015). Atualmente o estado do Tocantins (TO) tem contribuído para a produção nacional e principalmente para a segurança alimentar do norte do País, já que o frete e os tributos do arroz gaúcho tem boa contribuição para o preço final do produto.

Os estados do RS, SC e TO são responsáveis por mais de 80% da produção nacional de arroz. Especificamente, o RS responde por 69% da produção nacional (8,64 milhões de toneladas), cultivada em 1,12 milhão de hectares, com uma produtividade média de 7.716 kg/ha, (CONAB, 2015). Em decorrência, a cultura do arroz é de extrema importância socioeconômica para o RS, apresentando renda bruta de aproximadamente cinco bilhões de reais, o que representa mais do que 3% do ICMS e 2,74% do PIB (PINTO, 2015). Segundo a autora supracitada, a lavoura orizícola é responsável pelo emprego de 32,7 mil trabalhadores gaúchos, sendo 27% temporários.

4.2 A irrigação na cultura do arroz

A quantidade de água utilizada atualmente pelos setores agrícola, industrial e doméstico no mundo, representa 69%, 19% e 12%, respectivamente. No Brasil, esses setores utilizam 60%, 17% e 23% da água, respectivamente (FAO/AQUASTAT, 2014). Dentre as atividades demandantes de água no setor agrícola, a irrigação representa a maior parte. Em 2010, em 48,5% da área utilizada para irrigação no Brasil, foi adotado o método de irrigação por superfície (FAO/AQUASTAT, 2015).

Entre os sistemas de irrigação utilizados para a agricultura, a irrigação por superfície é a que apresenta uma menor eficiência e maior consumo de água (BERNARDO et al.,2009). Apenas no Estado do Rio Grande do Sul, 83% do volume de água utilizado são destinados para esse fim (NORONHA, 2006).

Historicamente, a produção de arroz irrigado sempre ocorreu em áreas inundáveis, onde as mudas eram transplantadas em terreno previamente inundado e na presença de lâmina de água (FAROOQ et al.,2011).

O Rio Grande do Sul apresenta a maior área cultivada de arroz do País. No Estado, utiliza-se predominantemente o sistema de irrigação por inundação contínua,

a qual é responsável por um consumo médio de 12 bilhões de $m^3\text{safr}^{-1}$ (PINTO, 2015).

A necessidade real de água requerida pela cultura de arroz é aquela utilizada para o desenvolvimento das plantas e sua transpiração, porém uma grande quantidade de água é perdida por evaporação, percolação e fluxo lateral e, eventualmente, por escoamento superficial quando o nível da água excede o nível da taipa. Todavia, essas perdas podem ser minimizadas por um manejo adequado da irrigação, embora não possam ser eliminadas (STONE, 2006).

O consumo médio histórico de água para a irrigação por inundação contínua das lavouras de arroz do Rio Grande do Sul é de $2 \text{ L s}^{-1}\text{ha}^{-1}$ ($17,3 \text{ mmdia}^{-1}$), equivalendo a uma eficiência de 40-45%. No entanto, com o manejo adequado da irrigação, associado a condições favoráveis de relevo e de solo, a eficiência de irrigação pode atingir valores próximos de 60% (EMBRAPA, 2005). Kopp (2015), avaliando 160 estações de bombeamento na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, encontrou entre 37 e 55% das vazões unitárias com intervalos entre 2-2,5 e 1,5-2 $\text{L s}^{-1}\text{ha}^{-1}$, respectivamente.

Porém, nos últimos anos, em áreas onde existe controle de vazão e os custos são divididos entre os produtores, tem-se reduzido o consumo hídrico. Por exemplo, nas últimas cinco safras, no perímetro irrigado da barragem do Chasqueiro, em Arroio Grande, RS, o consumo médio de água em, aproximadamente, 3000 ha foi de $1,5 \text{ L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$, incluindo as perdas existentes em 30 km de canais.¹ Na barragem do arroio Duro em Camaquã, onde existe controle da vazão unitária para cada produtor, a vazão unitária média liberada, após a saturação do solo, da lavoura, é $\approx 1,2 \text{ L s}^{-1}\text{ha}^{-1}$.²

Entre as alternativas propostas nos últimos anos para racionalizar o uso da água na produção de arroz estão os diferentes sistemas de irrigação e de manejo da água para o sistema inundado, particularmente: i) irrigação por inundação intermitente (ZANG et al., 2012); ii) irrigação com manutenção do solo saturado e ausência de lâmina de água (PETRINI et al., 2013); iii) irrigação por gotejamento (GOVINDAN et al., 2012); e iv) irrigação por aspersão (RHINE et al., 2011; VORIES et al., 2013).

¹ Comunicação pessoal de Joaquim Manoel Soares Carriconde Filho – Engenheiro Agrícola da barragem do Arroio Chasqueiro.

² Comunicação pessoal de Éverton Fonseca – Chefe de irrigação da Associação dos Usuários do Perímetro de Irrigação do Arroio Duro.

O uso da técnica da irrigação por aspersão para a cultura do arroz irrigado teve início na década de 90, com a finalidade de reduzir o uso da água e oferecer alternativas de cultivo onde o uso da irrigação por inundação era predominante (WESTCOTT; VINES, 1986). Nos últimos anos no Brasil, tem-se conseguido obter bons resultados e grandes reduções no consumo de água com a utilização da técnica de irrigação por aspersão (PARFITT et al., 2011).

A irrigação por aspersão do arroz em sistema pivô central ou sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel (SMITLM), além do ganho com a redução de água e a possibilidade da aplicação de uma lâmina de água variável nas diferentes fases da lavoura, de acordo com a necessidade hídrica da cultura, existe a possibilidade do uso da técnica de fertirrigação com baixo investimento, mediante a aquisição do sistema de irrigação.

4.3 Fertirrigação

A fertirrigação é definida, segundo Papadopoulos (1999), como sendo a fertilização das plantas via água de irrigação, a qual poderá ou não contemplar a necessidade hídrica das culturas. O uso dessa técnica permite flexibilizar a época de aplicação dos nutrientes, que pode ser fracionada conforme a necessidade da cultura nos seus diversos estádios de desenvolvimento resultando em maior eficiência no uso de nutrientes pelas culturas.

O uso da fertirrigação se adequa melhor aos sistemas de irrigação localizados, principalmente a irrigação por gotejamento, devido ao fato de que a maior parte do sistema radicular das plantas fica localizada nas regiões onde há maior umidade do solo, gerada por um ou mais gotejadores. Desta forma, otimiza-se o uso dos fertilizantes. No caso de microaspersores, condição semelhante é obtida quando se utiliza um microaspersor por planta (BORGES; COELHO, 2009). Embora venha sendo usada principalmente em sistemas localizados, a fertirrigação também pode ser usada em sistemas de irrigação por aspersão. Exemplo de aplicação é o de Bruno et al. (2015), que trabalhando com fertirrigação na cultura de cafeeiro, via sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central, concluíram que é possível reduzir em até 200 kg/ha de N (1/3 da dose utilizada usualmente) sem influenciar na produtividade da cultura, demonstrando a viabilidade da técnica de fertirrigação em sistema pivô central.

Geralmente, a fertirrigação é utilizada em cultivos de alto valor agregado, possivelmente devido a esse fato a técnica é amplamente utilizada em fruticultura (COELHO et al., 2014). Porém, pesquisas mostram que a técnica pode ser empregada com sucesso em outras culturas agrícolas e com outros sistemas de irrigação, como a aspersão, com aumento na produtividade e eficiência dos fertilizantes (RHINE et al., 2011).

Dentre as vantagens da adoção da fertirrigação podem ser citadas: i) o atendimento das necessidades nutricionais da cultura de acordo com a sua curva de absorção; ii) as quantidades e concentrações dos nutrientes podem ser adaptadas às necessidades da planta nas diferentes fases fenológicas e em função das condições climáticas; iii) economia de mão de obra; iv) redução de atividades de pessoas ou máquinas na área da cultura, evitando compactação e favorecendo as condições físicas do solo (COELHO et al., 2000).

A fertirrigação pode ser empregada com qualquer fertilizante, desde que os mesmos apresentem algumas características químicas adequadas. Os fertilizantes devem apresentar altas concentrações, pureza e, principalmente, solubilidade, propriedade esta que varia com a temperatura e pureza da água (BORGES; SILVA, 2011).

O atendimento das exigências nutricionais das culturas requer a aplicação de diversas fontes de nutrientes. Todavia, quando há mistura de dois ou mais fertilizantes requer o conhecimento prévio da compatibilidade entre esses, para que não haja formação de compostos insolúveis (BORGES; SILVA, 2011). Se houver incompatibilidade entre íons, é necessário realizar a aplicação alternada de fertilizantes isoladamente.

Dentre os fertilizantes utilizados na fertirrigação, destaca-se o nitrogênio como sendo o nutriente mais aplicado, pois além de ser um dos macronutrientes de maior exigência durante o ciclo da maioria das culturas, é um nutriente extremamente móvel no perfil do solo, estando sujeito a inúmeras reações, que podem levar a perda do fertilizante no sistema solo-planta-atmosfera e, conseqüentemente, à redução de sua eficiência (CASTELLANOS et al., 2013)

4.4 Uniformidade de aplicação de água e de fertilizante

A distribuição de água em um sistema de irrigação é um processo que passa por duas etapas: aplicação de água na superfície do solo e redistribuição de água no interior do solo (MATEOS, 1998). A produtividade das culturas irrigadas e a uniformidade de irrigação apresentam estreita relação (MANTOVANI et al., 2012), sendo bastante dependente da fase de distribuição de água na superfície do solo.

De acordo com Oliveira et al. (2004), o coeficiente de uniformidade é um indicador que caracteriza a forma com que o sistema de irrigação aplica água e reflete o grau de regularidade da distribuição no espaço, considerando a sobreposição dos jatos dos aspersores. A uniformidade é afetada por parâmetros do sistema como: a pressão de serviço, o tipo e a altura dos emissores, fatores esses passíveis de serem controlados. Todavia, fatores climáticos, tais como a velocidade do vento (FARIA et al., 2009) e a evaporação da água de irrigação (AZEVEDO et al., 1999) também afetam a uniformidade de distribuição de água na superfície do solo, que não podem ser controlados.

Dentre os coeficientes utilizados para a determinação da uniformidade de aplicação de água de sistemas de irrigação, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942), tem sido o mais adotado, sendo este recomendado pela norma técnica NBR 14244 para a avaliação de uniformidade de sistemas mecanizados de irrigação do tipo lateral móvel (ABNT, 1998). Cabe ressaltar, ainda, que de acordo com a norma supracitada, os valores de CUC podem ser classificados como: i) $CUC < 80\%$ - ruim; ii) $80\% < CUC < 84\%$ - regular; iii) $85\% < CUC < 89\%$ - bom; e iv) $CUC > 90\%$ - muito bom.

A uniformidade de distribuição do fertilizante aplicado via água de irrigação (fertirrigação) na superfície do solo depende da uniformidade de aplicação de água do equipamento de irrigação (coeficiente de uniformidade), visto que o fertilizante é aplicado simultaneamente com a irrigação. Todavia, a distribuição do fertilizante no perfil do solo, também é dependente das reações desse íon com as partículas minerais e orgânicas do solo (BORGES; COELHO, 2009).

4.5 Formas de nitrogênio

Na atmosfera, o nitrogênio (N) é encontrado na forma gasosa, preferencialmente na forma de uma molécula biatômica (N_2), conhecida como dinitrogênio, que constitui grande parte do ar atmosférico. Também pode ser encontrado na forma de outros gases, tais como a amônia (NH_3), o óxido nitroso (N_2O) e óxido nítrico (NO) (POLETTTO et al., 2008).

O ar atmosférico seco é composto por 78,09% de nitrogênio (N_2), 20,95% de oxigênio, 0,92% de argônio e pequenas quantidades de outros gases (BARRY; CHORLEY, 2013). Mesmo que esse elemento seja abundante na natureza, a tripla ligação que esse gás apresenta ligando os dois átomos para a formação de sua molécula, faz com que ele seja um dos gases mais estável e pouco reativo da natureza (RUSSELL, 1994).

Nos solos, o N pode estar presente tanto na forma orgânica quanto na forma inorgânica, sendo a transformação de uma forma para a outra frequente e dinâmica. Na forma orgânica, a maioria do N se encontra ligado à matéria orgânica (MO) ou a algum composto diretamente ligado a MO. Já na forma inorgânica, o nitrogênio geralmente é encontrado em seus estados extremos de redução (amônio - NH_4^+) ou de oxidação (nitrato - NO_3^-). (CANTARELLA, 2007).

A maior parte do nitrogênio no solo ocorre na forma orgânica, onde participa de diversos compostos, tais como aminoácidos (unidades fundamentais das proteínas) e nucleotídeos (subunidades formadoras do RNA, DNA e Adenosina Trifosfato), entre outros (HAVLIN et al., 2014).

4.6 Nitrogênio no solo

A quantidade total de nitrogênio dos solos é extremamente variável e seus valores tendem a diminuir com a profundidade do solo (HAVLIN et al., 2014). A maioria do N no solo é proveniente do ar, originando de deposições atmosféricas de formas combinadas de N (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) e, principalmente, da fixação biológica de N_2 , por meio de bactérias formadoras de nódulos em raízes de leguminosas (STEVENSON, 1982).

Em solos minerais e na camada arável, os teores de N total podem se encontrar em um intervalo de 0,02 a 0,5% (HAVLIN et al., 2014). Contudo, em solos orgânicos

os teores de N total podem atingir patamares de até 2,5%, sendo que 95% desse teor de N encontram-se na superfície do solo, mais especificamente na camada de 0-0,05 m de profundidade (XINQIANG et al., 2014). As ligações químicas do N com o carbono orgânico do solo (C) presentes em aminoácidos, compostos ligados ao amônio (NH_4^+), ácidos insolúveis, as aminas e outras formas fazem também com que o N esteja presente no solo na forma orgânica (WARREN, 2014).

O teor de matéria orgânica do solo (MO) tem uma relação direta com os teores de N total, por essa razão esse parâmetro é utilizado como indicador da disponibilidade de N para fins de recomendação de adubação nitrogenada (TEDESCO et al., 2004). Zheng et al. (2008), trabalhando em solos com elevados teores de MO, encontraram correlação positiva e crescente ($r^2=0,92^*$) entre o teor de MO e o teor de nitrogênio no solo.

A relação carbono/nitrogênio (C/N) dos resíduos culturais adicionados aos solos é um dos principais fatores químicos que regula a direção e o sentido das reações de imobilização e de mineralização do nitrogênio no solo. Cantarella (2007) relata que para haver uma condição de equilíbrio entre a mineralização e a imobilização, a relação C/N do substrato deve estar na faixa de 20 a 30.

4.6.1 Nitrogênio orgânico

O processo de imobilização do N consiste na conversão de formas inorgânicas para a forma orgânica (HAVLIN et al., 2014). Os responsáveis por essa conversão são os microrganismos que incorporam o N inorgânico disponível nos componentes do solo às suas células.

O nitrogênio orgânico no solo está presente em aminoácidos, compostos ligados ao amônio (NH_4^+), ácidos insolúveis, amino-açúcares e outros compostos não identificados. A fração exata de cada parte que compõe o nitrogênio orgânico ainda não está claramente definida, porém sabe-se que a maioria do N orgânico do solo encontra-se associada aos ácidos fúlvicos e húmicos presente na matéria orgânica do solo e caracterizados por sua solubilidade em ácidos e bases (REDDY; DELAUNE, 2008).

Relações C/N altas fazem com que os microrganismos recorram ao N inorgânico disponível no solo para sustentar o crescimento da população microbiana e, com isso, a imobilização do N no solo prevalece (CANTARELLA, 2007).

A mineralização por si só não garante a estabilidade do N no solo, já que após a *amonificação* o amônio (NH_4^+) está sujeito a várias reações. Esse cátion pode ser convertido a nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-) (POLETTO et al., 2008), pode ser absorvido diretamente pelas plantas (SANTOS et al. 2011) ou ser convertido a amônia (NH_3) e perdido para a atmosfera por volatilização (ZHOU et al., 2009), ou ainda, ser fixado por minerais de argila do tipo 2:1. Estudos indicam que entre 2 e 4% das formas orgânicas de N do solo são mineralizadas a cada ano (POWER, 1987).

Camargo et al. (1999), trabalhando com diversas classes de solos no estado do Rio Grande do Sul, relataram que a fração potencialmente mineralizável variou de 5,8 a 13,9% do N total e correlacionou-se positivamente ($r=0,887^{**}$) com a absorção de N por plantas de milho.

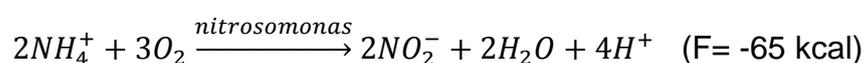
4.6.3 Nitrificação

O processo de nitrificação ocorre em sequência à mineralização, nele o cátion NH_4^+ é convertido a nitrito e posteriormente a nitrato, perdendo oito elétrons e sua valência passa de -3 para +5. Esse processo é realizado no solo por bactérias quimiautotróficas que obtêm energia no processo de oxidação do N e que podem sintetizar todos os seus constituintes celulares (carbono) a partir do CO_2 .

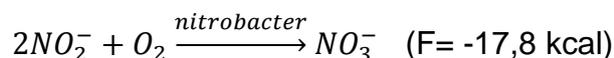
A nitrificação é a principal responsável pela transformação do amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-) nos solos não alagados. A quantidade, distribuição e tamanho de poros existentes no solo e a sua capacidade de retenção de água são fatores determinantes para a quantidade de amônio a ser nitrificada pelas bactérias, já que as mesmas são aeróbias (STEVENS et al., 2008).

Pode-se dividir a nitrificação em duas etapas ou reações: a nitritação e a nitratação. A primeira é responsável pela oxidação do amônio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-), envolvendo o ganho de seis elétrons, como mostra a reação 3. A segunda reação é responsável pela oxidação do nitrito (NO_2^-) à nitrato (NO_3^-), fazendo com que o ânion receba dois elétrons, como mostra a reação 4.

Reação 3. Nitritação



Reação 4. Nitratação



Como mostram as reações 3 e 4, o ganho energético da oxidação do nitrito (NO_2^-) em nitrato (NO_3^-), reação 4, é muito menor do que a oxidação do amônio (NH_4^+) em nitrito (NO_2^-), reação 3. Isso faz com que as bactérias do tipo *nitrobacter* tenham que processar uma maior quantidade de substrato para sobreviver, fazendo com que a velocidade de oxidação do NO_2^- seja maior que a do NH_4^+ . Essa dinâmica de reações faz com que o NO_2^- , que é tóxico para a maioria dos organismos do solo, não se acumule no perfil do solo (BORNER et al., 1986).

Além das bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, que são as mais importantes para o processo, Norton (2000) lista diversas bactérias que tem a capacidade de oxidar o amônio (NH_4^+). Pesquisas recentes utilizando técnicas de biologia molecular mostram que as bactérias do gênero *Nitrospira* são mais numerosas em solos agrícolas (ADDISCOTT, 2005), embora as *Nitrosomonas* sejam mais ativas.

A atividade das bactérias quimiautotróficas e, conseqüentemente, a porcentagem de N nitrificado além do fornecimento de amônio (NH_4^+) depende de diversos fatores ambientais, tais como: temperatura, pH, disponibilidade de oxigênio e umidade do solo (θ). Ambientes com temperaturas entre 25 a 40°C (SCHMIDT, 1982), pH entre 4,5 a 6,5 (DANCER et al., 1973), disponibilidade de O_2 (CANTARELLA, 2007) e umidade do solo equivalente a 50-70% da capacidade de água disponível (quando existe uma porosidade suficiente para a difusão de O_2) são aqueles em que a nitrificação é maximizada.

4.6.4 Desnitrificação

A desnitrificação é um processo respiratório, na ausência do O_2 , no qual os óxidos de N servem como receptores finais de elétrons. Esse conceito foi introduzido por Firestone (1982) e substituiu aquele em que se considerava a desnitrificação apenas como a redução microbiana de nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) à formas gasosas de N, pois há diversos tipos de metabolismos microbianos que resultam na produção de gases de N.

As fontes de O_2 dos organismos anaeróbios são o nitrato (NO_3^-) e o nitrito (NO_2^-), como mostra a reação 5.

Reação 5. Passos da desnitrificação



O dinitrogênio (N_2), que retorna a atmosfera na forma gasosa, representa cerca de 90% do total de perdas gasosas do nitrogênio relacionadas à desnitrificação no sistema solo-planta-atmosfera (HAVLIN et al., 2014), entre tanto, essa perda é essencial para o fechamento do ciclo do nitrogênio nesse sistema.

Entre os inúmeros fatores que afetam o processo de desnitrificação, os três mais importantes são: i) conteúdo de água na superfície do solo - quando 60% dos poros do solo são ocupados por água, começa a haver um declínio na atividade aeróbia e um incremento na atividade microbiana anaeróbia; contudo, perdas significativas de N na forma gasosa passam a ocorrer quando 80% da porosidade total do solo é ocupada por água; ii) presença de nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) na zona anaeróbia do solo - a quantidade de NO_3^- e NO_2^- , juntamente com a ausência de O_2 nos poros do solo são proporcionais ao potencial de desnitrificação; iii) quantidade de carbono a ser decomposto e/ou solúvel na superfície do solo e pH do solo - esses parâmetros são importantes porque as reações microbianas que ocorrem na desnitrificação envolvem as cadeias de carbono e de hidrogênio (REDDY; DELAUNE, 2008).

4.7 O nitrogênio na solução do solo e sua absorção pelas plantas

O nitrogênio está presente na solução do solo na forma orgânica com compostos solúveis ligados ao carbono ou inorgânica na forma de amônio ou nitrato, tanto de N mineralizado pela matriz do solo quanto de N fornecido de forma antrópica, via adubação (HAVLIN et al., 2014).

A quantidade de N presente na solução do solo é aquela necessária para que seja mantido um equilíbrio químico entre a matriz do solo e a solução do solo. Esse equilíbrio é influenciado pela capacidade de troca de cátions do solo (CTC), pelo pH e pelo teor e tipo de matéria orgânica existente no solo (BURLE et al., 1997). Warren

(2014) relata que a maior parte do N presente na solução do solo é originário do N orgânico e que o N mineral contribui com uma pequena fração na solução do solo.

Embora as plantas possam absorver o nitrogênio na forma orgânica, como aminoácidos, a absorção de formas orgânicas de N é menos efetiva do que a de formas minerais de N (LOPES; LIMA, 2015). Para que ocorra a absorção de nitrogênio através das raízes das plantas é necessário que esse nutriente esteja disponível na solução do solo na forma de um ânion ou cátion, ou seja, nitrato (NO_3^-) ou amônio (NH_4^+) (DENG et al., 2014).

Na absorção de nitrogênio, a preferência por um cátion ou um ânion é apenas de forma a manter um equilíbrio químico no interior da planta e para suprir a demanda do nutriente. Porém, dependendo do tipo de íon que a planta absorver, o pH na rizosfera e a absorção de outros nutrientes serão alterados, pois o N é o único elemento que as plantas podem absorver nas duas formas iônicas (NOBLE et al., 2008). Quando o N é absorvido na forma de amônio (NH_4^+), a planta libera íons hidrogênio (H^+) na mesma proporção química. Isso faz com que ocorra diminuição do pH da rizosfera, reduzindo a absorção de outros cátions necessários para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais, tais como o cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) e potássio (K^+) (DENG et al., 2014).

4.8 Fontes de nitrogênio utilizadas como fertilizante na agricultura

O nitrogênio pode ser disponibilizado nas seguintes formas químicas: **nítrica** [nitrato de cálcio – $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; nitrato de potássio – KNO_3 ; nitrato de magnésio – $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$]; **amoniacal** [(DAP – $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$; MAP – $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; sulfato de amônio – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$]; **nítrica-amoniacal** (nitrato de amônio – NH_4NO_3); e **amídica** [ureia – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] (SILVA; BORGES, 2009). Entre as fontes de N utilizadas na agricultura destaca-se a ureia, por apresentar baixo preço e baixo potencial de salinização, quando comparada a outras fontes, e devido à sua alta concentração de N (45%) (QUEIROZ et al., 2010).

Outra forma de divisão das fontes de N é quanto à porcentagem de nutrientes que cada uma apresenta e ao seu estado físico (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição de fertilizantes nitrogenados solúveis.

Fonte	Quantidade de nutrientes (%)							Estado Físico
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Cl	
Amoníaco anidro	82	---	---	---	---	---	---	Gasoso
Aquamônia	20-25	---	---	---	---	---	---	Líquido
Bicarbonato de amônio	21-23	---	---	---	---	---	---	Sólido
Cloreto de amônio	25-26	---	---	---	---	---	66	Sólido
Nitrato de amônio	33-34	---	---	---	---	---	---	Sólido
Sulfato de amônio	21	---	---	---	---	24	---	Sólido
Nitrato de cálcio	15-27	---	---	9-19	---	---	---	Sólido
Polifosfato de amônio	10-11	34-37	---	---	---	---	---	Líquido
Fosfato de diamônio	18-21	46-54	---	---	---	---	---	Sólido
Fosfato de monoamônio	11	48-55	---	2	0,5	1-3	---	Sólido
Ureia	45-46	---	---	---	---	---	---	Sólido
Fosfato de ureia	17	43-44	---	---	---	---	---	Sólido
Sulfato de ureia	30-40	---	---	---	---	6-11	---	Sólido
Nitrato de cálcio	15	---	---	34	---	---	---	Sólido
Nitrato de potássio	13	---	44	0,5	0,5	0,2	1,2	Sólido
Nitrato de sódio	16	---	---	---	---	---	0,6	Sólido

Fonte: Havlin et al. (2014).

A escolha da fonte de N para fertirrigação ou adubação convencional é de extrema importância, pois um erro em sua escolha pode resultar em salinização do solo (QUEIROZ et al., 2010), entupimento no sistema de irrigação, ineficiência do fertilizante devido às perdas que podem ocorrer por volatilização da amônia (SCIVITTARO et al., 2010a), lixiviação do nitrato ou até mesmo fixação da amônia em argilas do tipo 2:1 (REDDY; DELAUNE, 2008).

4.9 Eficiência de fertilizantes nitrogenados

A fertilização por meio da adição de nutrientes ao solo na cultura do arroz bem como nas demais culturas é uma prática fundamental para a produção agrícola, quando utilizada de forma racional e eficiente (DINIZ, 2007; BERNAL et al., 2009).

Entre os nutrientes essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas, o nitrogênio ocupa uma posição de destaque, sendo que seu estudo no sistema solo-água-planta abrange sua distribuição e transformação das formas orgânicas e inorgânicas (STEVESON, 1982; STEVENS et al., 2012), a solubilidade do fertilizante utilizado, a sua necessidade pelas culturas (BORGES; COELHO, 2009) e a eficiência do seu uso – Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN), a qual é definida como a produtividade de grãos por unidade de nitrogênio utilizada (LEA; AZEVEDO, 2006).

O nitrogênio apresenta grande instabilidade no solo. Devido a esse fato, seu aproveitamento do total aplicado é relativamente baixo, pois ele pode sofrer uma série de reações até sua disponibilização às culturas, reações essas que irão influenciar diretamente a eficiência desse íon. Dependendo do manejo adotado, as reações de oxirredução fazem com que até 70% do N aplicada seja perdida através da volatilização de amônia na cultura do arroz (BURESH et al., 2008).

A eficiência do uso do nitrogênio pelas plantas fisiologicamente pode ser dividida em dois processos: i) *ABSORÇÃO* – é a capacidade das plantas em translocar os íons (nitrato ou amônio) presentes na solução do solo até suas folhas e partes aéreas; e ii) *METABOLISMO DO N ABSORVIDO* – é a capacidade de transformar esses íons em grãos, tubérculos, fruto ou em algum composto benéfico para as plantas (LEA; AZEVEDO, 2006).

Entre os diversos fatores que definem a disponibilidade de nitrato (NO_3^-) ou de amônio (NH_4^+) na solução do solo para absorção pelas plantas estão o tipo de solo e sua composição e a fonte de N utilizada. Dutra et al. (2014), avaliando quatro fontes nitrogenadas (nitrato de amônio, nitrato de cálcio, sulfato de amônio e ureia) com a utilização de uma dose de $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N em arroz irrigado pelo sistema de inundação contínua, verificaram a disponibilização de até duas vezes mais N na solução do solo com a utilização do nitrato de cálcio, quando comparado a ureia e outras fontes de N.

Para que sejam evitadas perdas de N por lixiviação na forma de nitrato é necessária uma dose não excessiva do nutriente associada a lâminas de irrigação ou chuvas, de forma que não haja percolação profunda. Bortolotto et al. (2012), observaram que a aplicação de uma elevada quantidade de fertilizante nitrogenado em plantações de café, via fertirrigação, associada à ocorrência de alto volume de chuva e à irrigação, são as principais causas de lixiviação de N no oeste da Bahia.

Vitti et al. (2002) constataram que a mistura de ureia com sulfato de amônio reduziu as perdas de amônia. Outra mistura a qual é recomendada e utilizada em fertirrigação é nitrato de amônia com ureia formando o UAN, uma vez que essa solução possui o N em formas mais estáveis (amídica, nítrica e amoniacal), com menor possibilidade de perdas por volatilização (SILVA; BORGES, 2009).

4.10 Recomendação e formas convencionais de aplicação de nitrogênio na cultura do arroz

Geralmente as recomendações de N em arroz são baseadas em experimentos empíricos que levam em consideração apenas a produtividade da cultura (DUNN; STEVENS, 2006), de modo que o uso indiscriminado desse nutriente assume fundamental importância, devido à possibilidade de contaminação de águas subterrâneas e superficiais e por contribuir para a diminuição da eficiência.

Nos últimos anos o uso indiscriminado desse nutriente, na agricultura moderna, originou vários problemas ambientais em diversas partes do mundo. Na China ocorreram problemas de eutrofização (LI et al., 2010), emissão de gases do efeito estufa e acidificação do solo (ZHOU et al., 2009).

Na região Sul do Brasil, a indicação de adubação para o arroz irrigado por inundação consiste em aplicar uma pequena fração da dose recomendada na semeadura (10% a 15%) e o restante em cobertura, parcelado entre o início do perfilhamento e a iniciação da panícula (SOSBAI, 2014).

Scivittaro et al. (2010b), trabalhando com quatro doses de N (30, 60, 90, 120 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) descrevem um comportamento quadrático da produtividade em função dessas doses aplicadas e com uma produtividade máxima atingida com a dose de N de 67,2 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Todavia, a recomendação da SOSBAI (2014) é em função do teor de matéria orgânica no solo e da expectativa de resposta à adubação, variando as doses entre 70 e 120 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Com relação à dose e ao parcelamento do nitrogênio para o arroz irrigado por aspersão em solos classificados como Planossolos, existem poucos estudos e dúvidas sobre a distribuição que condiciona melhor aproveitamento do nutriente pela cultura. Todavia, Scivittaro et al. (2012) trabalhando com três doses do nutriente (55; 110; e 135 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N), no parcelamento e na época de aplicação da cobertura nitrogenada (perfilhamento, iniciação e exserção da panícula), concluíram que a produtividade de grãos e a eficiência de utilização de N pelo arroz são beneficiados pela expansão do período de adubação até a fase reprodutiva.

4.11 Recuperação de nitrogênio na cultura do arroz

Na cultura do arroz a recuperação do N dos fertilizantes aplicados raramente excede 50% (JANDREY, 2008), parte não utilizada pela cultura é retida no solo e o restante é perdido dos sistemas agrícolas por vários processos, como lixiviação para fora da zona radicular, perdas gasosas por desnitrificação, volatilização de amônia do solo e foliar, fixação de amônia e imobilização biológica (VILLAS BÔAS, 1995).

Stevens et al. (2008) citam que em sistemas de produção de arroz não inundado, a aplicação de N é um desafio, devido às perdas potenciais por volatilização da ureia, a qual é perdida para atmosfera na forma de amônia. Stevens et al. (2011), em um estudo realizado com arroz irrigado por aspersão, concluíram que o uso de 25% e 75% de N, respectivamente, provindo das fontes ureia e UAN foi o a razão que proporcionou maior produtividade quando comparado a outros percentuais de mistura dessas mesmas fontes.

5. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo compreendeu três experimentos de campo, experimentos 1, 2 e 3, realizados, respectivamente, nas safras agrícolas 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015. O experimento 1 visou a avaliação do potencial de resposta do arroz irrigado por aspersão à aplicação de nitrogênio, bem como estabelecer o manejo desse nutriente aplicado em cobertura, incluindo variações na dose, parcelamento, época e frequência de aplicação do nutriente. Os experimentos 2 e 3 foram desenvolvidos para refinar os resultados obtidos no experimento 1, envolvendo a avaliação da resposta do arroz irrigado por aspersão ao manejo da adubação nitrogenada, utilizando a técnica de fertirrigação.



Figura 1 - Imagem aérea da área experimental na safra agrícola 2014/2015. Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS.

5.1 Caracterização da área experimental

Todos os três experimentos foram realizados em área pertencente à Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, localizada no município do Capão do Leão, Rio Grande do Sul. O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico eutrófico solódico (STRECK et al., 2008) e anteriormente à implantação do experimento 1, na safra 2012/2013, foi amostrado para caracterização física (camada de 0-10 cm de profundidade). Os resultados da caracterização física do solo da área experimental são apresentados na tabela 2. De acordo com o diagrama textural, o solo apresenta textura franco-arenosa (argila- 10%; silte- 34% e areia- 56%).

Tabela 2 - Atributos físicos do solo da área experimental.

Atributo	Média	Máximo	Mínimo
DS (kg dm ⁻³)	1,6	1,7	1,5
Ma (%)	11	15	7
Mi (%)	33	37	30
Pt (%)	44	49	39

DS-densidade do solo; Ma-macroporosidade; Mi-microporosidade; Pt-porosidade total. Adaptado de Pinto (2015).

Anualmente, antecedendo a implantação do cultivo de arroz, foi realizada, ainda, a coleta de amostra de solo composta na área experimental (camada de 0-20 cm de profundidade), para caracterização química para fins de fertilidade (Tabela 3).

Nas três safras agrícolas, os teores de matéria orgânica, fósforo e potássio no solo foram interpretados, respectivamente, como baixo, alto e médio, conforme a SOSBAI (2012).

O clima da região de estudo é classificado, segundo Köppen, como Cfa, ou seja, temperado úmido com verões quentes. A temperatura e a precipitação média anual são, respectivamente, 17,9°C e 1500 mm (EMBRAPA, 2016).

Tabela 3 - Resultados da análise química do solo da área experimental por ocasião da instalação dos experimentos 1, 2 e 3*.

Experimento	Safra	Classe textural	pH(água)	MO	P	K	Ca+Mg	Al	CTC (pH7,0)
				g dm ⁻³	----- mg dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----		
Exp. 1	2012/2013	4	5,3	15,0	7,4	52	3,0	0,3	5,9
Exp. 2	2013/2014	4	5,4	15,0	7,8	37	3,7	0,1	6,0
Exp. 3	2014/2015	4	5,3	16,0	8,1	42	3,6	0,1	5,9

* Tedesco et al. (1995).

MO- matéria orgânica; P- fósforo disponível (Mehlich1); K- potássio extraível (Mehlich1); Ca, Mg e Al- cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, respectivamente; e CTC(pH 7,0)- capacidade de troca de cátions pH 7,0.

5.2 Avaliação do sistema de irrigação e de fertirrigação

Foram realizados 13 ensaios para a avaliação da uniformidade de distribuição de água do sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel. Estes ensaios foram realizados, no período de cultivo do arroz, seguindo a norma técnica NBR 14244 (ABNT, 1998).

Nos ensaios de campo foram utilizados coletores da marca Fabrimar com área de coleta igual a 50,265 cm², os quais foram instalados à uma altura de 70 cm da superfície do solo. Foram utilizadas duas linhas de coletores, instaladas paralelamente ao equipamento de irrigação, distantes 5 m entre si. Em cada linha foram instalados 88 coletores espaçados 3 m entre si, sendo o volume de água em cada coletor mensurado com o auxílio de uma proveta de vidro de 100 mL, logo após o término do ensaio.

As variáveis meteorológicas durante os ensaios de campo foram mensuradas com uma estação marca Davis, modelo Vantage Pro2 Plus, instalada a 50 m da área irrigada e a uma altura de 2 m da superfície do solo.

Além da determinação da uniformidade de distribuição de água de todo o equipamento, determinou-se, também, a uniformidade de distribuição de água somente nos vãos dois (2) e três (3) do equipamento, por serem os vãos nos quais os experimentos foram conduzidos.

Considerando que a uniformidade de distribuição do nitrogênio na área fertirrigada é igual à uniformidade de distribuição de água do sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel, essa foi avaliada por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942), calculado por meio da Equação 1.

$$CUC=100 \left(\frac{\sum_i^n |X_i - X_m|}{n \cdot X_m} \right) \quad (1)$$

onde:

CUC – Coeficiente de uniformidade de Christansen, %;

X_i – lâmina de água no coletor de ordem i, mm;

X_m – média aritmética das lâminas de águas nos coletores, mm;

n – número de coletore

5.3 Experimento 1. Manejo do nitrogênio para o arroz irrigado por aspersão

5.3.1 Disposição das parcelas experimentais, implantação e condução da cultura do arroz

Uma área de 1295 m² (37 m x 35 m) irrigada por sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel foi subdividida em quatro blocos, contendo 12 parcelas cada bloco. Cada parcela possuía dimensões de 2,275 m de largura (13 linhas espaçadas em 0,175 m) por 5 m de comprimento. Considerou-se, como parcela útil, as nove linhas centrais de plantas de arroz com 4 m de comprimento. As parcelas foram separadas, entre si, por caminhos de 1 m de largura, a fim de evitar contaminação entre os tratamentos de adubação nitrogenada em cobertura.

O arroz foi implantado em sistema plantio direto sobre cobertura de nabo forrageiro, estabelecido no outono-inverno de 2012. A semeadura do arroz, cultivar BRS Pampa, foi realizada de forma mecanizada em 05/12/2012, utilizando-se densidade de 90 kg ha⁻¹ de sementes viáveis e espaçamento entre linhas de 17,5 cm. A adubação básica, localizada nos sulcos de semeadura, foi estabelecida de acordo com os resultados da análise química de solo e as exigências nutricionais do arroz irrigado, considerando-se expectativa de resposta alta da cultura à adubação (SOSBAI, 2012). Essa consistiu na aplicação de 350 kg ha⁻¹ da formulação 5-20-20.

O controle de plantas daninhas e demais tratos culturais seguiram as recomendações técnicas da pesquisa para a cultura de arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2012).

Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento da planta de arroz, utilizou-se, como referência, a escala de Counce et al. (2000). Para tanto, demarcaram-se 10 plantas em duas parcelas experimentais (tratamento referência), as quais foram acompanhadas a cada 2 ou 3 dias, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

5.3.2 Manejo da irrigação para arroz e monitoramento da solução do solo

Para o manejo da irrigação do arroz, foram instalados, a 10 cm de profundidade, sete sensores de tensão de água no solo, do tipo *Watermark*® (Figura 2A), e um sensor de temperatura, ligados a um datalogger (Figura 2B), programado para armazenar registros horários de dados. As irrigações foram realizadas sempre que a média das leituras dos sensores *Watermark*® foi igual ou superior a 20 kPa.



Figura 2 - Vista de sensor de tensão de água no solo do tipo *Watermark* (A) e de datalogger (B) instalados na área experimental.

Foram aplicadas lâminas de água distintas nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura, visto que a evapotranspiração do arroz é maior na fase reprodutiva, relativamente à fase vegetativa. Desta forma, foram aplicadas lâminas variando de 3 mm a 9 mm, na fase vegetativa, e variando de 6 a 15 mm, na fase reprodutiva, de acordo com o monitoramento da tensão de água no solo e a demanda da cultura.

Para o acompanhamento das concentrações de nitrato e amônio presente na solução do solo, próximo e na mesma profundidade dos sensores *Watermark*, foi instalado um extrator de solução. As coletas de soluções ocorreram aproximadamente três horas após cada fertirrigação e as concentrações de nitrato e amônio foram realizadas seguindo métodos descritos em Tedesco et al. (1995).

5.3.3 Tratamentos e delineamentos experimentais

Os tratamentos de adubação nitrogenada em cobertura para o arroz compreenderam as combinações de seis doses de nitrogênio (zero; 40; 80; 120; 160 e 200 kg ha⁻¹ de N) e de dois parcelamentos da adubação em cobertura (quatro e oito

aplicações) espaçadas entre si, em aproximadamente sete dias (variando de seis a oito dias). Incluiu-se, um tratamento adicional, considerado tratamento referência, representado pelo manejo convencional da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2012), o qual foi estabelecido considerando-se uma expectativa de resposta alta do arroz à adubação, qual seja: a aplicação de ureia granulada, na dose de 120 kg ha^{-1} de N, parcelada em duas aplicações: a primeira no início do perfilhamento (estádio V4) e a segunda, na iniciação da panícula (estádio R0). Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental de blocos ao acaso em esquema fatorial ($6 \times 2 + 1$), com quatro repetições.

As adubações nitrogenadas em cobertura foram realizadas utilizando-se ureia (45% de N), como fonte de N. Com exceção do tratamento referência, todos os demais tratamentos que previam adubação em cobertura com N, 25% da dose de N foram aplicados via solo, no estágio de quatro folhas (V4), na forma de ureia granulada. Os 75% restantes da dose de N em cobertura prevista nos tratamentos foram aplicados na forma de solução aquosa de ureia, simulando o uso da técnica de fertirrigação, parcelados em quatro ou oito aplicações, conforme o tratamento. Essas aplicações foram feitas com periodicidade aproximadamente semanal, iniciando uma semana após a aplicação da ureia sólida (granulada). Para o tratamento referência, a adubação nitrogenada em cobertura foi parcelada em duas aplicações via solo, a primeira (70 kg ha^{-1} de N) no estágio de quatro folhas (V4) e a segunda (50 kg ha^{-1} de N) por ocasião da iniciação da panícula (estádio R0). A descrição detalhada dos tratamentos avaliados é apresentada na tabela 4.

Para as aplicações de nitrogênio, via fertirrigação manual, utilizou-se um conjunto constituído por pulverizador costal pressurizado com CO_2 , modelo pesquisa, dotado de barra de 2 m de largura contendo quatro (4) bicos espaçados de 50 cm. Imediatamente após as aplicações nitrogenadas, foi aplicada uma lâmina de irrigação de 5 mm, a fim de evitar a queima das folhas e auxiliar na incorporação do fertilizante nitrogenado ao solo.

Tabela 4 - Descrição dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado (Safrá 2012/2013).

Tratamento	Dose de Nitrogênio (kg ha ⁻¹ de N)		Número de aplicações/Frequência
	Ureia granulada	Ureia em solução	
Referência	Adubação nitrogenada em cobertura via solo (120 kg ha ⁻¹ de N, parcelados 70 kg ha ⁻¹ de N em V4 e 50 kg ha ⁻¹ de N em R0)		
T1	0	0	----
T2	10	30	4 / semanal
T3	20	60	4 / semanal
T4	30	90	4 / semanal
T5	40	120	4 / semanal
T6	50	150	4 / semanal
T7	0	0	----
T8	10	30	8 / semanal
T9	20	60	8 / semanal
T10	30	90	8 / semanal
T11	40	120	8 / semanal
T12	50	150	8 / semanal

5.3.4 Variáveis mensuradas e análise estatística

As variáveis utilizadas para avaliação dos tratamentos de adubação nitrogenada em cobertura para o arroz foram: teor de nitrogênio e índice relativo de clorofila (IRC) na folha índice, produtividade de grãos, componentes da produtividade, produção de matéria seca e acumulação de N nos colmos e folhas e nas panículas com grãos.

As variáveis indicadoras do nível de nitrogênio na planta de arroz (teor de nitrogênio e do índice relativo de clorofila na folha índice) foram medidas em duas ocasiões: uma semana após a conclusão da quarta fertirrigação e na floração plena (estádio R4). A determinação do teor de N (TEDESCO et al., 1995) foi realizada em amostras constituídas pela folha índice do arroz, coletadas de 48 plantas escolhidas ao acaso em cada parcela. O índice relativo de clorofila foi medido em clorofilômetro SPAD 502 - Minolta, resultando da média de três posições (basal, intermediária e

apical) da folha índice do arroz de dez plantas por parcela. Considera-se como folha índice do arroz, a última completamente desenvolvida (na fase vegetativa) ou a folha bandeira (na floração).

Por ocasião da maturação de colheita (R9) das plantas foi coletada uma amostra constituída por duas linhas de plantas com 0,5 m de comprimento de cada unidade experimental, para a determinação da acumulação de matéria seca e de nitrogênio nas plantas de arroz.

Ao final do ciclo de cultivo, foi realizada a colheita das plantas, determinando-se a produtividade de grãos e componentes desta. Os dados foram ajustados para uma umidade dos grãos de 130 g kg⁻¹.

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística, comparando-se as médias do fator manejo da adubação nitrogenada em cobertura pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O efeito do tratamento referência com os demais foi contrastado por meio do teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Adicionalmente, para avaliar o potencial de resposta do arroz irrigado por aspersão à adubação nitrogenada, realizou-se análise de regressão polinomial considerando-se os tratamentos envolvendo as seis doses de N aplicadas em cobertura.

5.4 Experimento 2. Manejo da adubação nitrogenada em cobertura, via fertirrigação mecanizada, para o arroz

5.4.1 Disposição das parcelas experimentais, implantação e condução da cultura do arroz

Este experimento foi realizado em duas safras agrícolas consecutivas 2013/2014 e 2014/2015, ocupando uma área de 3308 m² (82,7 m x 40,0 m) na safra 2013/2014 e de 3888 m² (97,2 m x 40,0 m) na safra 2014/2015. Ambas as áreas foram irrigadas por aspersão, usando um sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel.

Na safra 2013/2014, a área experimental foi subdividida em cinco parcelas (faixas), com dimensões de 4,55 m de largura por 36 m de comprimento; as faixas foram distanciadas, entre si, por caminhos de 10,0 m de largura, a fim de evitar possíveis interferências entre os tratamentos, por ocasião das aplicações de nitrogênio.

Na safra 2014/2015, a área experimental foi semelhante à descrita para a safra 2013/2014, incluindo, porém, uma parcela adicional (faixa), para a alocação de um novo tratamento.

Em ambas as safras, demarcaram-se em cada parcela (faixa) sete unidades experimentais com dimensões de 1,57 m de largura (nove linhas de arroz espaçadas em 17,5 cm) por 2,5 m de comprimento.

Na primeira safra (2013/2014), o arroz foi implantado em sistema convencional de preparo do solo, que compreendeu as operações de aração e gradagem da área. O arroz, cultivar BRS Pampa, foi semeado em 02/11/2013, utilizando densidade de 90 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento entre linhas de 17,5 cm. A adubação básica, localizada nos sulcos de semeadura, foi estabelecida de acordo com os resultados da análise química de solo e as exigências nutricionais do arroz irrigado, considerando uma expectativa de resposta alta da cultura à adubação (SOSBAI, 2012), consistindo na aplicação de 422 kg ha⁻¹ da formulação 5-25-25.

Por sua vez, na safra 2014/2015, o arroz foi implantado em sistema plantio direto, sobre a resteva do arroz da safra anterior. A semeadura do arroz, foi realizada em 24/10/2014, também utilizando-se a cultivar de arroz irrigado de ciclo precoce BRS Pampa, na densidade de 90 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento de 17,5 cm nas entrelinhas. A adubação básica foi realizada de forma localizada nos sulcos de semeadura, correspondendo a 400 kg ha⁻¹ da formulação 5-20-20, a qual foi estabelecida considerando-se os resultados da análise de solo e uma expectativa de resposta alta da cultura à adubação (SOSBAI, 2014).

5.4.2 Manejo da irrigação e monitoramento de formas minerais de nitrogênio na solução do solo

Para o manejo da irrigação em cada faixa, foram instalados, na profundidade de 0-10 cm, sete sensores de tensão de água no solo do tipo *Watermark*® e um sensor de temperatura, conectado a um *datalogger*. As irrigações foram realizadas individualmente em cada faixa, sempre que a média de leitura dos sete sensores fosse igual ou superior a 10 kPa.

Os procedimentos utilizados para o controle da tensão de água no solo e o manejo da irrigação do arroz foram semelhantes àqueles descritos para o experimento 1. No entanto, cabe ressaltar que as irrigações foram realizadas quando a média de

leitura dos sete sensores *Watermark*® atingia valor igual ou superior a 10 kPa. Também neste experimento, em ambas as safras, foram aplicadas lâminas de irrigação diferenciadas, sendo que na safra 2013/2014 nas fases vegetativa (variando de 4 a 9 mm) e reprodutiva (variando de 9 a 15 mm) e na safra 2014/2015 nas fases vegetativa (variando de 4 a 8 mm) e reprodutiva (variando de 6 a 12 mm).

Realizou-se, ainda, o acompanhamento das concentrações de nitrato e amônio na solução do solo após os eventos de fertirrigação. Para tanto, instalaram-se em posição adjacente e na mesma profundidade dos sensores *Watermark*® um extrator de solução. As coletas de soluções foram procedidas cerca de três horas após as fertirrigações. O preparo e análise das concentrações de nitrato e amônio na solução do solo seguiram métodos descritos em Tedesco et al. (1995).

5.4.3 Tratamentos e delineamentos experimentais

Na safra 2013/2014, os tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, via fertirrigação mecanizada, compreenderam quatro doses de nitrogênio em cobertura (zero; 80; 120 e 160 kg ha⁻¹ de N), sendo 25% da dose aplicada a lanço em área total, por ocasião do início do perfilhamento das plantas de arroz, correspondendo ao estágio de quatro folhas (V4), na forma de ureia granulada. O restante das doses (75% do total) foi aplicado via fertirrigação, na forma de solução aquosa de ureia, parcelado em cinco aplicações com frequência, aproximadamente, semanal. A primeira aplicação de N via fertirrigação foi realizada uma semana após a adubação via solo.

O delineamento experimental adotado foi o de faixas com cinco tratamentos na safra 2013/2014 e com seis tratamentos na safra 2014/2015, ambos delineados com sete repetições. Os tratamentos incluíram, ainda, um tratamento referência, representado pelo manejo convencional da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2012), considerando-se uma expectativa de resposta alta da cultura à adubação, qual seja a aplicação de ureia granulada, na dose de 120 kg ha⁻¹ de N, parcelada em duas aplicações: uma no estágio de quatro folhas - V4 (70 kg ha⁻¹ de N) e outra na iniciação da panícula - estágio R0 (50 kg ha⁻¹ de N). A descrição detalhada dos tratamentos avaliados é apresentada na tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado por aspersão avaliados na safra 2013/2014.

Tratamento	Dose de Nitrogênio (kg ha ⁻¹ de N)		Número de Aplicações
	Ureia granulada	Fertirrigação	
Referência	Adubação nitrogenada em cobertura via solo (120 kg ha ⁻¹ de N, parcelados 70 kg ha ⁻¹ de N em V4 e 50 kg ha ⁻¹ de N em R0)		
T1	0	0	----
T2	20	60	5/ semanal
T3	30	90	5 / semanal
T4	40	120	5 / semanal

Na safra 2014/2015, repetiram-se os tratamentos da safra anterior, incluindo-se, porém, uma dose adicional de nitrogênio (200 kg ha⁻¹ de N) para o arroz, aplicado via fertirrigação. Nessa safra, alterou-se, também, o parcelamento da adubação nitrogenada via fertirrigação, que incluiu quatro ou seis aplicações, de acordo com a dose aplicada (Tabela 6).

Tabela 6 - Descrição dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado por aspersão avaliados na safra 2014/2015.

Tratamento	Dose de N(kg ha ⁻¹) / época de aplicação					
	V4-V5	V7-V8	V10	R0	R2	R3
T1	0	0	0	0	0	0
T2	20	20	20	20	0	0
T3	20	20	20	20	20	20
T4	26,67	26,67	26,67	26,67	26,67	26,67
T5	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33
Referência	Adubação nitrogenada em cobertura via solo (120 kg ha ⁻¹ de N, parcelados 70 kg ha ⁻¹ de N em V4 e 50 kg ha ⁻¹ de N em R0)					

A razão de os tratamentos T2 a T3 terem diferentes frequências de aplicação nessa safra foi a necessidade de avaliar o efeito de estender a adubação nitrogenada além da fase vegetativa sobre o desempenho produtivo e eficiência de utilização do nitrogênio pelo arroz.

Em ambas as safras (2013/2014 e 2014/2015), para a realização das fertirrigações, acoplou-se, ao sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel, um injetor de fertilizante marca comercial Solomaq® que, por ser um equipamento para pivô central, requereu algumas adaptações para uso em equipamento com movimento lateral. A quantidade de fertilizante (ureia) necessária para que cada faixa recebesse a dose correta de fertilizante estabelecida para os diferentes tratamentos, em todo o

comprimento do sistema de irrigação, foi diluída em 40 L de água e a injeção das soluções preparadas foi realizada assim que os aspersores começaram a fertirrigar cada parcela/faixa.

A partir dos resultados de testes prévios, foi possível identificar a abertura da válvula necessária para que todo o volume de solução tivesse sido injetado no sistema, quando o mesmo finalizasse a fertirrigação de cada parcela. Como o volume de solução aplicado foi único para os diferentes tratamentos, variou-se a concentração da solução injetada no sistema entre os tratamentos.

5.4.4 Variáveis mensuradas

Em ambas as safras, a avaliação dos tratamentos compreendeu a determinação do nível de nitrogênio na planta de arroz nos estádios de sete a oito folhas (V7-V8) e na floração plena (R4). Para tanto, foram realizadas determinações do teor de N e do índice relativo de clorofila na folha do arroz. A determinação do teor de N (TEDESCO et al., 1995) foi realizada em oito subamostras constituídas pela folha índice (estádios V7-V8) ou folha bandeira do arroz (estádio R4), coletada de 48 plantas escolhidas ao acaso de cada parcela. O índice relativo de clorofila foi medido com a utilização de um clorofilômetro, modelo SPAD 502 - Minolta, resultando da média de três posições (basal, intermediária e apical) da folha índice/bandeira do arroz de dez plantas por parcela.

O efeito dos tratamentos foi avaliado, ainda, pelo acompanhamento dos teores de formas minerais de nitrogênio na solução do solo imediatamente após as fertirrigações.

Quando as plantas atingiram o estágio de maturação de colheita (R9), coletaram-se, de cada parcela/faixa, oito amostras constituídas por duas linhas de plantas com 0,5 m de comprimento, para a determinação da acumulação de matéria seca e de nitrogênio nas plantas de arroz. Os resultados obtidos foram utilizados, ainda, para a avaliação da eficiência de utilização de nitrogênio proveniente do fertilizante pelo arroz. Para tanto, as plantas foram separadas em panículas e grãos e em colmos e folhas.

Ao final do ciclo de cultivo, foi realizada a colheita das plantas, determinando-se a produtividade de grãos e componentes desta. Os dados foram ajustados para uma unidade de 130 g kg⁻¹.

Calculou-se, ainda, a dose de máxima eficiência econômica da adubação nitrogenada para o arroz irrigado por aspersão (Equação 2), considerando os preços do adubo e do arroz vigentes no mercado nacional da safra 2015/2016 (ureia - R\$ 1500,00 Mg⁻¹, arroz - R\$ 43,00 saca⁻¹).

$$\frac{dY}{dX} = \frac{P_f}{P_p} \quad (2)$$

onde:

Y – Produtividade de grãos (kg ha⁻¹);

X – Dose aplicada de N (kg ha⁻¹);

P_f – Preço do fertilizante (R\$ kg⁻¹ de N);

P_p – Preço do produto (R\$ kg⁻¹ de arroz).

Para a estimativa do total de N (TN) absorvido pelo arroz, utilizou-se a Equação

3.

$$NA = R \cdot NP + MC \cdot NC \quad (3)$$

onde:

NA – Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz (kg ha⁻¹);

R – Produção de matéria seca dos grãos (kg ha⁻¹);

NP – Porcentagem de nitrogênio das panículas com grãos (%);

MC – Produção de matéria seca dos colmos e folhas (kg ha⁻¹);

NC – Porcentagem de nitrogênio nos colmos e folhas (%).

A recuperação aparente do N (RAN) para cada tratamento foi calculada de acordo com Primavesi et al. (2005) (Equação 4).

$$RAN = 100 \cdot \frac{(TN_F - TN_T)}{DN} \quad (4)$$

onde:

RAN – Recuperação aparente do nitrogênio (%);

TN_F – Total de nitrogênio acumulado no tratamento fertilizado (kg ha⁻¹);

TN_T – Total de nitrogênio acumulado no tratamento testemunha (kg ha⁻¹);

DN – Dose de nitrogênio utilizada (kg ha⁻¹).

A eficiência agronômica do uso do nitrogênio (EAUN) e a eficiência fisiológica do uso do nitrogênio (EFUN) foram calculadas de acordo com Fageria (2009), conforme descrito nas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$EAUN = \frac{P_F - P_T}{DN} \quad (5)$$

onde:

EAUN – Eficiência agronômica do uso do nitrogênio (kg kg⁻¹);

P_F – Produtividade de grãos referente ao tratamento fertilizado (kg ha⁻¹);

P_T – Produtividade de grãos referente ao tratamento testemunha (kg ha⁻¹);

DN – Dose de nitrogênio utilizada (kg ha⁻¹).

$$EFUN = \frac{MSPA_F - MSPA_T}{NAPA_F - NAPA_T} \quad (6)$$

onde:

EFUN – Eficiência fisiológica do uso do nitrogênio (kg kg⁻¹);

MSPA_F – Massa seca da parte aérea da planta referente ao tratamento fertilizado (kg ha⁻¹);

MSPA_T – Massa seca da parte aérea da planta referente ao tratamento testemunha (kg ha⁻¹);

NAPA_F – Nitrogênio acumulado na parte aérea da planta referente ao tratamento fertilizado (kg ha⁻¹);

NAPA_T – Nitrogênio acumulado na parte aérea da planta referente ao tratamento testemunha (kg ha⁻¹).

Exclusivamente na safra 2014/2015, foi realizada a coleta quinzenal da parte aérea de plantas de arroz (Tabela 7), para o estabelecimento da marcha de acumulação de matéria seca e de absorção de nitrogênio. As coletas consistiram na amostragem de plantas de arroz (duas linhas de 0,5 m de comprimento), com cinco repetições por tratamento. O material vegetal colhido foi separado em colmos e folhas e panículas com grãos (coletas realizadas após a floração), secado em estufa com ventilação forçada de ar até massa constante e avaliado para determinação da

produção de matéria seca. Na sequência, foi moído e analisado para determinação do teor de nitrogênio no tecido vegetal.

Tabela 7 - Datas e estádios de desenvolvimento das plantas de arroz por ocasião das coletas para estabelecimento da marcha de acumulação de matéria seca e absorção de nitrogênio.

Coleta	Data	Estádio
Primeira	03/12/14	V5
Segunda	18/12/14	V8
Terceira	05/01/15	V10-V11
Quarta	19/01/15	R1
Quinta	04/03/15	R2
Sexta	19/02/15	R5-R6
Sétima	04/03/15	≈R9

Os dados obtidos foram ajustados a um modelo matemático, cuja seleção baseou-se na análise prévia das tendências de crescimento da massa de matéria seca e de acumulação de nitrogênio na parte aérea das plantas de arroz, a partir de análise gráfica, optando-se, pelo modelo capaz de descrever o comportamento dessas variáveis em relação ao tempo.

A equação sigmoidal escolhida para descrever a taxa de crescimento e a marcha de absorção de nitrogênio foi a equação logística generalizada, descrita em Amabile et al. (2003) (Equações 7 e 8). Visando uma melhor adesão dos dados para a estimativa dos parâmetros da equação ajustada, utilizou-se a função Solver do software 'Microsoft Excel', onde a célula usada como função objetiva foi o somatório do quadrado dos resíduos e este tendeu a um valor nulo.

$$MSPA = \theta / (1 + \exp^{(\alpha - \beta \cdot X)^\lambda}) \quad (7)$$

onde:

MSPA – Massa seca da parte aérea da planta (kg ha^{-1});

exp – base dos logaritmos neperianos;

X – Dias após a emergência;

θ , α , β e λ – parâmetros a serem ajustados.

$$NAPA = \theta / (1 + \exp^{(\alpha - \beta \cdot X)^\lambda}) \quad (8)$$

onde:

NAPA – Nitrogênio acumulado na parte aérea da planta de arroz (kg ha⁻¹);

exp – base dos logaritmos neperianos;

X – Dias após a emergência;

θ , α , β e λ – parâmetros a serem ajustados.

Nos modelos utilizados (Equações 7 e 8), MSPA e NAPA expressam a magnitude da variável dependente (massa de matéria seca da parte aérea ou quantidade de nitrogênio na parte aérea); θ é o parâmetro assintótico (correspondendo à massa de matéria seca da parte aérea e à quantidade de nitrogênio na parte aérea no estágio R9); α corresponde ao parâmetro de locação; β determina a taxa de expansão da massa de matéria seca da parte aérea e da quantidade de nitrogênio absorvida; λ define o ponto de inflexão; exp. refere-se à base dos logaritmos neperianos e X refere-se ao tempo em que o crescimento ocorre.

O coeficiente de determinação (R^2) para os modelos de estimativa da massa da parte aérea da planta foi determinado através da equação 9.

$$R^2 = 1 - (\sum QR / n \cdot \text{var}_{n1}^{nx}) \quad (9)$$

onde:

R^2 – Coeficiente de determinação;

$\sum QR$ – Somatório do quadrado dos resíduos;

n – Número de observações utilizadas na estimativa;

var_{n1}^{nx} – Variância dos dados utilizados para a estimativa.

5.4.5 Análise estatística

Em ambas as safras, os dados obtidos de desempenho agrônomo e produtivo do arroz foram submetidos à análise de variância por meio do software R. Nas safras 2013/2014 e 2014/2015 compararam-se as médias do fator dose de N por análise de regressão linear ou polinomial. Adicionalmente, contrastou-se o efeito do tratamento referência com os demais, utilizando-se o teste de Dunnett ($p < 0,05$).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Uniformidade de aplicação de água e variáveis climatológicas

Na figura 3 são apresentados os valores das lâminas médias observadas e o valor médio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) para os 13 ensaios de campo do equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.

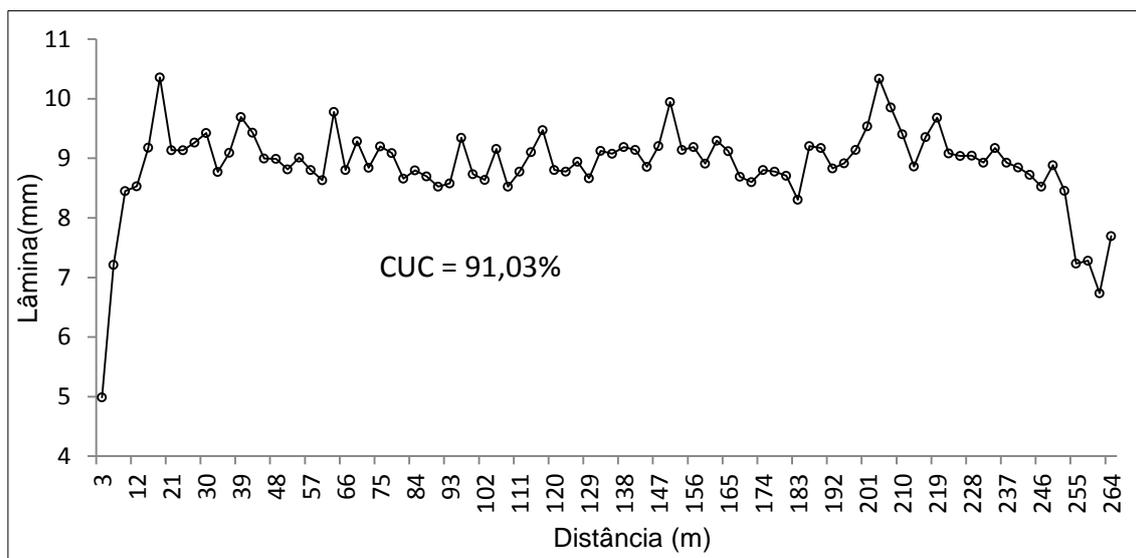


Figura 3 - Lâminas médias coletadas na avaliação do sistema de irrigação.

A lâmina média coletada para todos ensaios de campo foi de 9,28 mm, resultando em um valor de CUC igual a 91,03%, sendo este valor classificado, de acordo com a norma técnica NBR 14244 (ABNT, 1998), como muito bom.

Considerando que o experimento foi realizado sob os vãos dois (2) e três (3) do equipamento mecanizado de irrigação, são apresentados (Figura 4), os valores de lâmina lâminas médias observadas e o valor médio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) desses vãos.

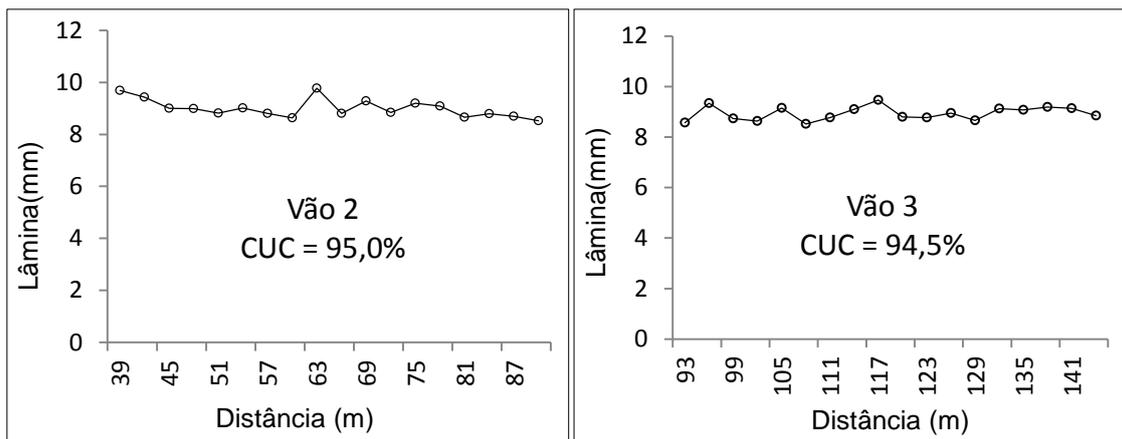


Figura 4 - Lâminas médias coletadas na avaliação do sistema de irrigação no segundo vão e no terceiro vão.

De acordo com o observado na figura 4, os resultados das lâminas médias coletadas no segundo e terceiro vãos do sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel foram, respectivamente, de 9,00 e 8,94 mm, resultando em valores de CUC iguais a 95,0% e 94,5%, respectivamente.

O valor do CUC, nos trechos em que foram realizados os experimentos 1 e 2, supera os valores mínimos aceitáveis propostos por Mantovani e Ramos (1994), sendo classificados como muito bom pela norma técnica NBR 14244 (ABNT, 1998). Os resultados do CUC nos 2° e 3° vãos são superiores, quando comparados ao CUC de todo o comprimento do sistema mecanizado de irrigação, e as variações nas lâminas coletadas são inferiores, quando se realiza a mesma comparação.

Um valor alto de coeficiente de uniformidade é imprescindível para a redução dos excessos e déficits de aplicação de água em uma irrigação por aspersão e, assim, toda a superfície do solo recebe uma lâmina de irrigação mais próxima possível da prevista. Zocoler et al. (2013), avaliando sistemas de irrigação por aspersão, encontraram valores de CUC de 92%.

Além do aspecto técnico, existe a questão econômica, onde é possível obter-se uma redução significativa no consumo de energia com a melhoria da uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação tipo pivô central (MENDOZA; FRIZZONE, 2012).

Quando se utiliza a técnica da fertirrigação, os mesmos aspectos técnicos utilizados para a distribuição de água podem ser utilizados para inferir sobre a distribuição de fertilizantes. Por tratar-se de um experimento de fertirrigação com doses de adubação nitrogenada, a obtenção de um alto CUC na área foi de extrema importância para garantir que todas as parcelas recebessem a dose prevista e, assim,

não houvesse excessos ou déficits na aplicação de nitrogênio, o que poderia levar a erro de interpretação dos resultados obtidos.

As lâminas utilizadas nas irrigações nas três safras agrícolas são apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - Lâmina total de irrigação para cada período do ciclo da cultura do arroz, para as safras 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015.

Lâminas de irrigação (mm)			
Safras	Período vegetativo	Período reprodutivo	Total
2012/2013	135	168	303
2013/2014	282	201	483
2014/2015	123	282	405
Precipitações (mm)			
2012/2013	36	135	171
2013/2014	223	297	520
2014/2015	352	266	617

Ao longo das três safras agrícolas foram utilizadas uma média de 397 mm/safra, para que fosse irrigado todo o ciclo produtivo da cultura do arroz. A explicação para que na safra 2013/2014 a lâmina aplicada durante o período vegetativo fosse 40% superior a lâmina aplicada no período reprodutivo, deve-se a uma maior precipitação acumulada no período com distribuições uniformes ao longo do tempo, fazendo com que esses eventos suprissem uma parte relevante da evapotranspiração da cultura reduzindo sua necessidade de irrigação.

A distribuição de precipitações ao longo das três safras é apresentada na figura 5. Durante as safras 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015, os totais de precipitação acumulada foram, respectivamente, de 170,7; 520,7 e 615,7mm. Nas safras 2013/2014 e 2014/2015, a disponibilidade de água foi maior, todavia a figura 5B mostra que, mesmo tendo havido maior precipitação total nessa safra, a distribuição das mesmas no tempo foram extremamente irregulares, principalmente na fase vegetativa.

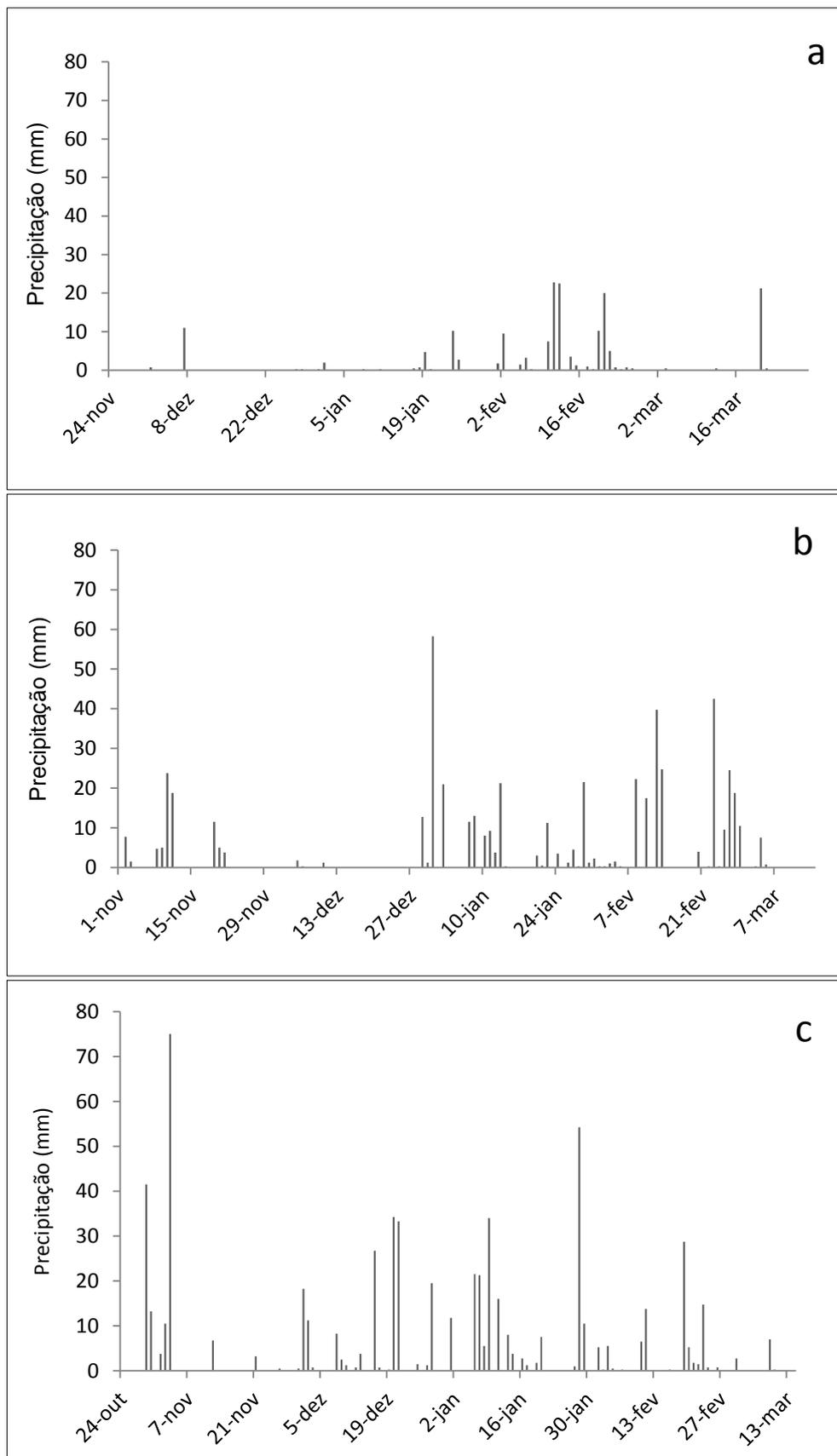


Figura 5 - Distribuição temporal da precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura do arroz irrigado por aspersão nas safras de 2012/13 (a), 2013/14 (b) e 2014/15 (c).

6.2 Experimento 1 – Safra 2012/2013

No experimento 1, a germinação do arroz ocorreu 8 dias após a semeadura, em 05/12/2012. A primeira adubação nitrogenada em cobertura ocorreu 22 dias após a emergência, correspondendo ao estágio de quatro a cinco folhas (V4-V5). Nos tratamentos em que o N foi parcelado em 4 aplicações, as fertirrigações estenderam-se até o final da fase vegetativa (próximo a R0), enquanto que nos tratamentos em que o N foi parcelado em 8 aplicações, as fertirrigações estenderam-se até a floração (estádio R4). A maturação de colheita do arroz ocorreu 127 DAE, estendendo o ciclo da cultivar BRS Pampa (120 dias, considerando-se a data de emergência), em uma semana, em relação ao sistema de cultivo irrigado por inundação do solo (SOSBAI, 2014). Pinto (2015), utilizando a mesma cultivar irrigada por aspersão, relatou alongamento de ciclo superior, de 12 a 21 dias, relativamente ao sistema irrigado por inundação.

As significâncias do teste de Dunnett, aplicado para contrastar o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, em que o nutriente foi aplicado via solo são apresentadas na Tabela 9. Por compreender dados referentes a variáveis distintas, optou-se pela discussão dos resultados separadamente, de acordo com a sequência em que são apresentados nos subitens: nível de nitrogênio na planta; desempenho agrônômico e produtivo e acumulação de matéria seca e de nitrogênio pela planta de arroz.

Tabela 9 - Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação manual, frente ao tratamento referência com aplicação do nutriente via solo, safra 2012/2013.

Variável	Tratamento ¹												
	Ref.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
IRC - estádio V7-V8	37,5	38,1 ^{ns}	38,9 ^{ns}	39,5 ^{ns}	39,7 ^{ns}	40,8 ^{ns}	42,4*	38,1 ^{ns}	38,6 ^{ns}	38,6 ^{ns}	38,6 ^{ns}	39,3 ^{ns}	39,4 ^{ns}
N folha - estádio V7-V8 (%)	3,5	3,3 ^{ns}	3,2 ^{ns}	3,3 ^{ns}	3,4 ^{ns}	3,8 ^{ns}	3,9 ^{ns}	3,3 ^{ns}	3,3 ^{ns}	3,2 ^{ns}	3,3 ^{ns}	3,4 ^{ns}	3,3 ^{ns}
IRC - estádio R4	39,0	36,2 ^{ns}	39,8 ^{ns}	38,1 ^{ns}	40,9 ^{ns}	40,0 ^{ns}	40,1 ^{ns}	36,2 ^{ns}	39,1 ^{ns}	40,7 ^{ns}	40,6 ^{ns}	41,8 ^{ns}	43,2*
N folha - estádio R4 (%)	2,9	2,6 ^{ns}	2,6 ^{ns}	2,7 ^{ns}	2,9 ^{ns}	2,8 ^{ns}	3,0 ^{ns}	2,6 ^{ns}	2,8 ^{ns}	2,8 ^{ns}	3,0 ^{ns}	3,1 ^{ns}	3,3 ^{ns}
Estatura de planta (cm)	73,0	65,7 ^{ns}	72,0 ^{ns}	70,0 ^{ns}	71,1 ^{ns}	72,2 ^{ns}	68,6 ^{ns}	65,7 ^{ns}	68,8 ^{ns}	72,8 ^{ns}	71,5 ^{ns}	71,7 ^{ns}	71,2 ^{ns}
Número de perfilhos	664	628 ^{ns}	702 ^{ns}	748 ^{ns}	777 ^{ns}	747 ^{ns}	761 ^{ns}	628 ^{ns}	670 ^{ns}	688 ^{ns}	632 ^{ns}	756 ^{ns}	685 ^{ns}
Número de panículas	520	556 ^{ns}	632 ^{ns}	578 ^{ns}	590 ^{ns}	540 ^{ns}	525 ^{ns}	556 ^{ns}	551 ^{ns}	484 ^{ns}	460 ^{ns}	575 ^{ns}	575 ^{ns}
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	4281	3298 ^{ns}	4782 ^{ns}	3986 ^{ns}	4237 ^{ns}	4398 ^{ns}	3160 ^{ns}	3298 ^{ns}	4546 ^{ns}	5663 ^{ns}	5195 ^{ns}	4607 ^{ns}	3535 ^{ns}
Esterilidade de espiguetas (%)	20,8	15,9*	18,2 ^{ns}	15,6*	19,0 ^{ns}	23,0 ^{ns}	21,4 ^{ns}	15,9*	18,3 ^{ns}	16,2 ^{ns}	16,2 ^{ns}	21,6 ^{ns}	25,7*
Peso de 1000 grãos (g)	24,6	24,4 ^{ns}	24,4 ^{ns}	24,5 ^{ns}	25,1 ^{ns}	24,8 ^{ns}	24,8 ^{ns}	24,42 ⁿ	25,6 ^{ns}	25,2 ^{ns}	25,0 ^{ns}	25,1 ^{ns}	25,0 ^{ns}
								s					
Produção de matéria seca nos colmos e folhas (kg ha ⁻¹)	7112	4562**	5780**	6236 ^{ns}	6834 ^{ns}	7438 ^{ns}	7686 ^{ns}	4562**	6005*	6093 ^{ns}	6452 ^{ns}	7242 ^{ns}	7591 ^{ns}
Produção de matéria seca nas panículas (kg ha ⁻¹)	6904	4060**	4332**	5746 ^{ns}	6325 ^{ns}	7404 ^{ns}	7856 ^{ns}	4060**	4397**	5721 ^{ns}	6538 ^{ns}	7249 ^{ns}	7867 ^{ns}
Produção de matéria seca na parte aérea (kg ha ⁻¹)	14016	8620**	10111**	11982 ⁿ	13158 ⁿ	14842 ⁿ	15542 ^{ns}	8622**	10402	11814 ⁿ	12990 ⁿ	14491 ⁿ	15458 ^{ns}
				s	s	s			*	s	s	s	
Nitrogênio acumulado nos colmos e folhas (kg ha ⁻¹)	53	27*	34 ^{ns}	51 ^{ns}	56 ^{ns}	57 ^{ns}	73 ^{ns}	27*	38 ^{ns}	42 ^{ns}	49 ^{ns}	64 ^{ns}	74 ^{ns}

Continua...

Tabela 9 - Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação manual, frente ao tratamento referência com aplicação do nutriente via solo.

Variável	Tratamento ¹												
	Ref.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Nitrogênio acumulado nos grãos	66	35*	38**	54 ^{ns}	54 ^{ns}	69 ^{ns}	81 ^{ns}	35*	44 ^{ns}	57 ^{ns}	66 ^{ns}	73 ^{ns}	89 ^{ns}
Nitrogênio acumulado na parte aérea	119	62**	73**	105 ^{ns}	111 ^{ns}	126 ^{ns}	154 ^{ns}	62**	82*	99 ^{ns}	115 ^{ns}	137 ^{ns}	163**

IRC = índice relativo de clorofila; ¹T1; T2; T3; T4; T5 e T6: dose de N em cobertura correspondente a zero; 40; 80; 120; 160 e 200 kg ha⁻¹, respectivamente, sendo 25% aplicado via solo, no estágio de quatro folhas, e 75% via fertirrigação manual, parcelado em quatro aplicações semanais; T7; T8; T9; T10; T11 e T11: dose de N em cobertura correspondente a zero; 40; 80; 120; 160 e 200 kg ha⁻¹, respectivamente, sendo 25% aplicado via solo, no estágio de quatro folhas, e 75% via fertirrigação manual, parcelado em oito aplicações semanais; *, ** significativo a 5% e 1%.

6.2.1 Níveis de nitrogênio na planta

Quando se confronta o tratamento referência, com aplicação de N via solo, com os demais tratamentos para as variáveis indicadoras do nível de nitrogênio na planta de arroz, apenas a aplicação da maior dose de N(200 kg ha⁻¹), para a variável índice relativo de clorofila na folha (IRC) diferenciou-se em estádios distintos. Quando essa dose foi parcelada em 4 aplicações via água de irrigação, o IRC foi 13% superior ao da referência, no estádio de 11 folhas, e quando parcelada em 8 fertirrigações, o IRC foi 11% superior ao da referência, no estádio de floração plena (R4). Esses resultados devem estar associados à maior dose de N utilizada, sendo que as diferenças observadas ocorreram somente após a aplicação da dose total do nutriente. O comportamento observado indica que as variáveis indicadoras do nível de N na planta, de forma geral, são pouco sensíveis à variação na dose, bem como ao maior parcelamento da adubação nitrogenada para o arroz.

Não se verificou efeito da interação entre os fatores dose e parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura para nenhuma das variáveis indicadoras do nível de nitrogênio na planta de arroz, em ambas as épocas de avaliação (início da fase reprodutiva – estádio R1 e na floração plena – estádio R4). Porém, verificou-se efeito da dose de N sobre o nível de N na folha do arroz, em ambas as épocas de avaliação, e sobre o IRC na folha, exclusivamente por ocasião da floração. A média geral da variável índice relativo de clorofila (IRC) no estádio V7-V8 foi de 39,07, esse valor foi ligeiramente inferior aos observados por Cancellier et al. (2011) que avaliando a mesma variável com um clorofilômetro CFL 1030 - Falker e cultivares de terras altas encontraram valores médios entre 47 e 55.

Na figura 6, é apresentado o efeito da adubação nitrogenada aplicada em cobertura sobre o teor de nitrogênio na folha índice do arroz, determinado uma semana após a quarta fertirrigação com N, correspondendo ao estádio de diferenciação da panícula (R1). O IRC aumentou proporcionalmente à dose de N aplicada.

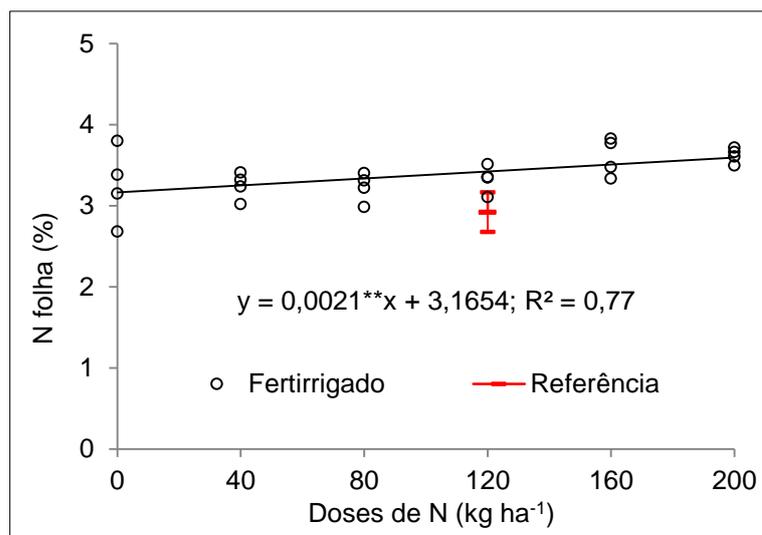


Figura 6 - Teor de nitrogênio na folha índice do arroz dos tratamentos referência e com aplicação de doses de nitrogênio em cobertura via fertirrigação manual. Avaliação realizada em R1. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo ao nível de 1%.

Nas figuras 7 e 8 são apresentados, respectivamente, o efeito da adubação nitrogenada sobre o índice relativo de clorofila (IRC) e teor de nitrogênio na folha bandeira das plantas de arroz por ocasião da floração. O aumento nas doses de N em cobertura proporcionou efeito direto sobre ambas as variáveis. Os resultados obtidos corroboram com aqueles observados por Mattje et al. (2013), ao trabalharem com quatro cultivares de arroz, uma de arroz irrigado e três de arroz de sequeiro, adubadas com duas doses de N (20 e 120 kg ha⁻¹), que determinaram maiores índices de clorofila na folha das plantas que receberam uma dose maior de N. Takay et al. (2010) estimaram a fotossíntese de plantas de arroz a partir do teor de clorofila na folha. Segundo esses autores, isso se deve ao fato de o maior teor de clorofila refletir maior número de cloroplastos, organela presente nas células vegetais, responsável pela fotossíntese.

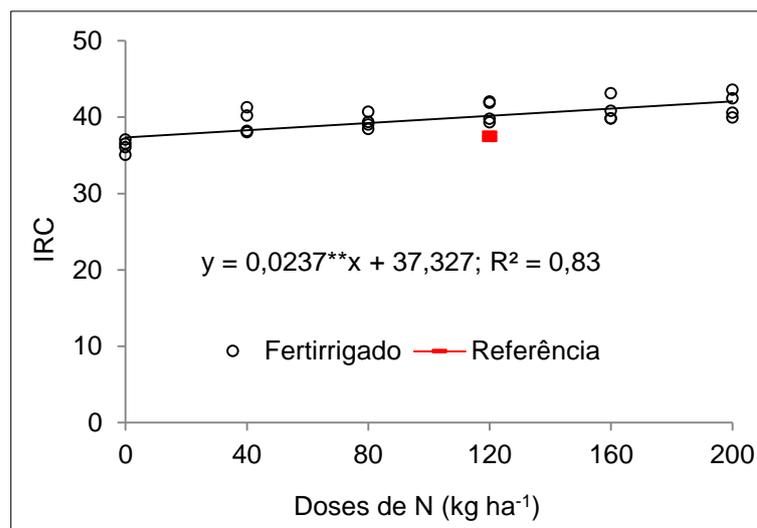


Figura 7 - Índice relativo de clorofila (IRC) na folha bandeira do arroz, na floração plena, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

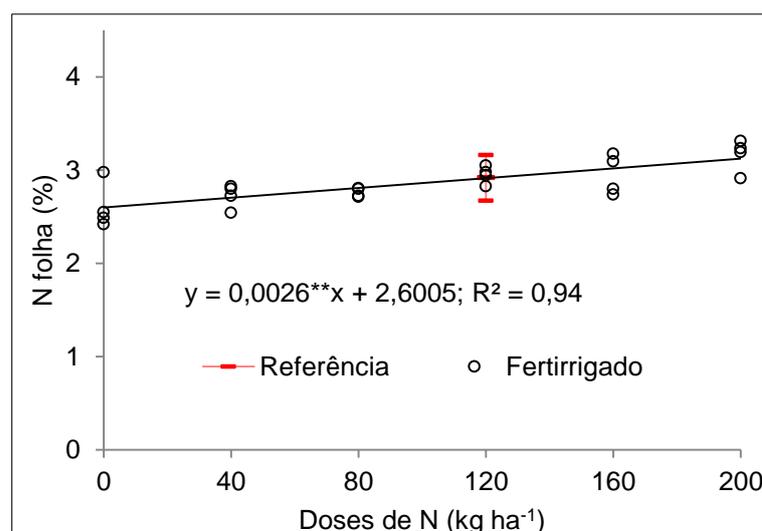


Figura 8 - Teor de nitrogênio na folha índice do arroz, na floração plena, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

A comparação dos valores de teor de N e IRC na folha nas duas épocas de avaliação (início da fase reprodutiva e floração) indicou valores maiores na primeira época. Esse resultado é atribuído ao fato de que, na fase reprodutiva, grande parte do N absorvido é metabolizado para a formação dos grãos, refletindo-se em menor teor do nutriente na folha. De acordo com a Sociedade(2004), a faixa de suficiência de nitrogênio para o arroz irrigado varia de 2,6 a 4,2%.

Pocojeski (2007) determinou o teor de N na última folha totalmente desenvolvida de seis cultivares de arroz irrigado por inundação na floração, obtendo valores entre 1,9% e 3,7%, intervalo que compreende os teores de N na folha medidos para a cultivar BRS Pampa, para todas as doses aplicadas do nutriente.

6.2.2 Desempenho agrônômico e produtivo do arroz

Diferença entre os tratamentos com aplicação de N via água de irrigação, relativamente ao tratamento referência com a aplicação de N via solo, foi determinada, apenas, para a variável esterilidade de espiguetas, para as doses zero e 80 kg ha⁻¹ de N em cobertura, parcelados em quatro aplicações, e para as doses zero e 200 kg ha⁻¹ de N em cobertura, parcelados em oito aplicações (Tabela 9). Assim como referido para as variáveis indicadoras do nível de N na planta de arroz, não se evidenciou benefício da variação da dose e do maior parcelamento da adubação em cobertura sobre o desempenho agrônômico e produtivo da planta de arroz, relativamente ao manejo convencional da adubação, com a aplicação do nutriente parcelada em apenas duas aplicações. Provavelmente esse resultado esteja associado ao fraco desempenho da cultura no presente experimento, independentemente do manejo da adubação nitrogenada. É provável, porém, que sob condições de cultivo mais favoráveis, garantindo melhor desempenho da cultura, essa resposta de forma positiva a manejos do N envolvendo maiores doses e parcelamento da adubação.

Dentre as variáveis associadas ao desempenho agrônômico e produtivo do arroz, não se determinou significância da interação entre os fatores dose e parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura para nenhuma das variáveis medidas. No entanto, determinou-se efeito do fator parcelamento da adubação para as variáveis número de perfilhos, número de panículas e peso de 1000 grãos (Tabela 10). Por sua vez, a variação na dose de nitrogênio influenciou as variáveis produtividade de grãos e esterilidade de espiguetas (Figuras 9 e 10).

Tabela 10 - Número de perfilhos e de panículas e peso de 1000 grãos de arroz, em função do parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, via fertirrigação manual.

Variável	Parcelamento do N	
	4 aplicações	8 aplicações
Nº perfilhos (m ⁻²)	727 a	677 b
Nº panículas (m ⁻²)	590 a	459 b
Peso de 1000 grãos (g)	24,67 b	25,06 a

Médias seguidas de mesma letra, nas linhas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O parcelamento da fertirrigação nitrogenada em quatro aplicações, que se restringiu à fase vegetativa, proporcionou maiores número de perfilhos e de panículas, relativamente ao parcelamento em oito aplicações, que se estendeu até a floração da cultura. No caso da variável número de perfilhos, o aumento correspondeu a 7,5% e para a variável número de panículas o aumento registrado foi maior, correspondente a 28% (Tabela 10). Esse resultado pode ser explicado pelo fato de o perfilhamento do arroz ocorrer durante a fase vegetativa (HERNANDES et al., 2010), sendo favorecido pela disponibilidade de N para as plantas. Adicionalmente, há que se considerar que a definição do componente de rendimento número de panículas ocorre no intervalo compreendido entre os estádios S0 (semente não embebida de água) e R4 (uma ou mais espiguetas da panícula do colmo principal em antese) (SOSBAI, 2007), ou seja, esse é um componente de rendimento estabelecido desde os estádios iniciais de desenvolvimento da planta, preponderantemente na fase vegetativa.

Por outro lado, maiores valores da variável peso de 1000 grãos foram observados para o parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura em oito aplicações (até a floração), relativamente ao parcelamento em quatro aplicações. O aumento observado foi tênue, correspondendo a 1,6% (Tabela 10). O peso de grãos também é um componente da produtividade do arroz, sendo definido, porém, a partir da floração (estádios R4 a R8) (SOSBAI, 2007), explicando o benefício de estender-se a adubação nitrogenada à fase reprodutiva sobre a variável. Larcher (1995) relata que o peso de 1000 grãos de arroz é diretamente proporcional à dose de N aplicada à cultura.

Na figura 9 é apresentado o efeito das doses de N sobre a produtividade de grãos do arroz. Os dados obtidos se ajustaram a um modelo quadrático. Essa tendência de modelo quadrático corroborando com resultados obtidos por Fageria et

al. (2007), Hernandez et al. (2010), Fabre et al. (2011), Rhine et al. (2011) e Fageria (2014).

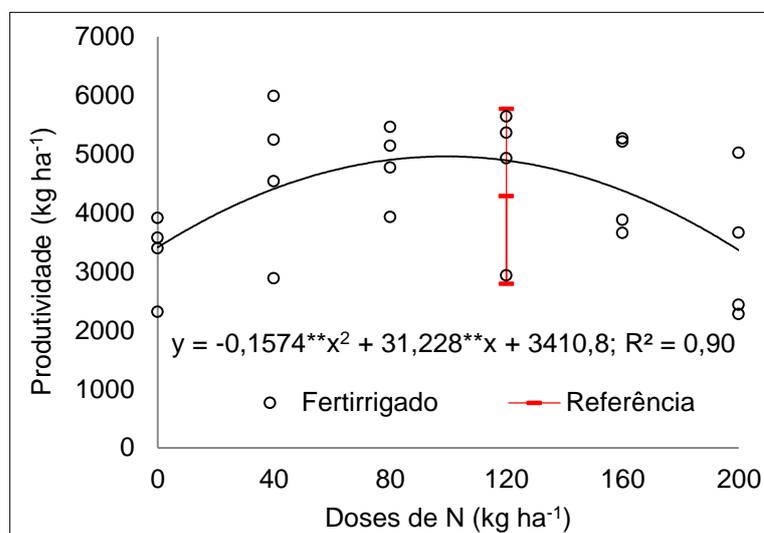


Figura 9 - Produtividade de grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; **significativo a 1%.

A partir da equação da figura 9, determinou-se a produtividade máxima do arroz, que foi de 4.960 kg ha⁻¹ de grãos secos e limpos, a qual foi obtida com a aplicação de 99 kg ha⁻¹ de N. Esse resultado demonstra baixa resposta da cultura, em produtividade, à adubação nitrogenada, o que é indicativo de que outros fatores, além do suprimento de N do solo, foram determinantes do baixo desempenho produtivo do arroz no presente experimento. Vários fatores devem ter determinado tal comportamento, particularmente o manejo da irrigação adotado nessa safra (baseado na tensão média de 20 kPa), o qual é restritivo para a cultivar de arroz irrigado BRS Pampa. Pinto (2015), trabalhando com a mesma cultivar em área adjacente a do presente estudo, verificou que a produtividade do arroz irrigado por aspersão diminuiu com o aumento da tensão de água do solo, recomendando a tensão de 10 kPa como o adequado para irrigação do arroz, sobretudo na fase reprodutiva, quando a demanda hídrica da cultura é maior. Adicionalmente, a época de semeadura tardia do arroz (27 de novembro), 12 dias além da data limite recomendada para o arroz na região de cultivo (SOSBAI, 2014), deve ter contribuído para a redução no potencial de produtividade da cultura. Outro fator que pode ter afetado a produtividade do arroz nessa safra é o procedimento de aplicação do fertilizante, que foi realizado manualmente, via pulverizador pesquisa, demandando repetidos caminhamentos nas

parcelas experimentais, resultando em danos e comprometimento nos perfilhos e, conseqüentemente, limitando o desempenho produtivo do arroz.

Os componentes número de panículas, número de grãos por panícula, esterilidade de espiguetas e massa de 1000 grãos, associados às condições climáticas determinam a produtividade do arroz (FAGERIA, 2014).

O efeito da adubação nitrogenada em cobertura sobre a variável esterilidade de espiguetas é apresentado na figura 10. Da mesma forma que para a produtividade de grãos, os dados obtidos foram ajustados ao modelo quadrático, com valor mínimo correspondente à aplicação da dose de 86 kg ha⁻¹ de N. Esse resultado concorda com aqueles encontrados por Scivittaro et al. (2013), ao compararem três doses de N para o arroz, determinando maior esterilidade quando da aplicação da maior dose de N em cobertura (120 kg ha⁻¹). Todavia, é importante ressaltar que essa variável é extremamente dependente de fatores climáticos, principalmente da temperatura durante o estágio de floração (LIU; BENNETT, 2010; STEINMETZ et al., 2013; SOSBAI, 2014).

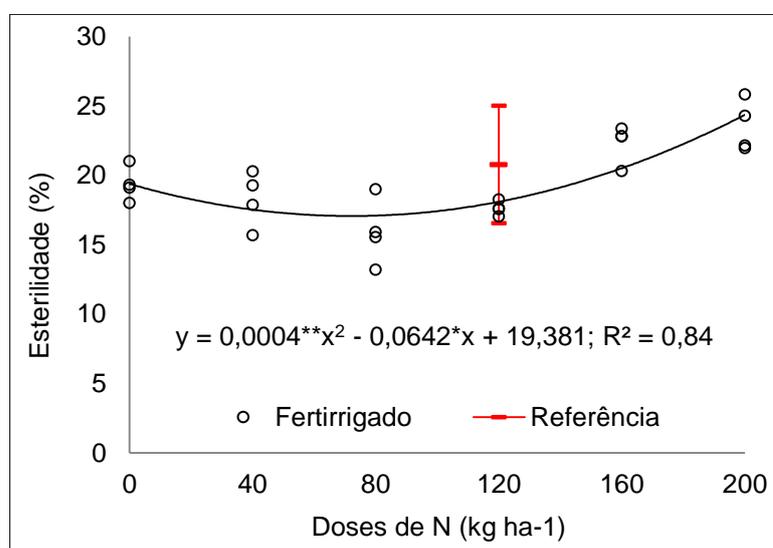


Figura 10 - Esterilidade de espiguetas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; *, **significativo a 5% e 1%.

A baixa esterilidade é um fator desejável, contribuindo positivamente para a produtividade do arroz. No presente estudo verificou-se que as doses de N aplicado ao arroz que promoveram menor esterilidade de espiguetas e produtividade máxima do arroz foram próximas. Scivittaro et al. (2013), Steinmetz et al. (2013) e Petrini et al. (2013), em estudos de diferentes naturezas com arroz irrigado por inundação do solo,

realizados no mesmo tipo de solo do presente estudo, determinaram menores esterilidades de espiguetas e maiores produtividades de grãos para a cultivar BRS Pampa. A distinção no desempenho produtivo da cultura entre esses e o presente experimento é atribuída, predominantemente, ao manejo de irrigação adotado, que neste estudo contemplou o manejo para uma tensão média de água no solo de 20 kPa, a qual é restritiva ao arroz, especialmente na fase reprodutiva (PINTO, 2015).

6.2.3 Acumulação de matéria seca e de nitrogênio na planta de arroz

A comparação do desempenho do tratamento referência (aplicação de cobertura nitrogenada via solo) com os demais (fertirrigação) sobre as variáveis associadas à acumulação de matéria seca nas plantas de arroz indicou diferença apenas para os tratamentos com omissão da aplicação de N, via fertirrigação (T1 e T7) e com a aplicação da menor dose do nutriente (T2 e T8). Tanto para os colmos e folhas, quanto para as panículas com grãos, o desempenho do tratamento referência superou aquele dos tratamentos testemunha e com a aplicação de menor dose de N em cobertura, via fertirrigação. Explica-se esse resultado pela maior quantidade de N fornecido pelo tratamento referência em relação aos demais.

Com relação ao N acumulado nos colmos e folhas e N acumulado nos grãos, a diferença com o tratamento referência restringiu-se, apenas, aos tratamentos com omissão da cobertura nitrogenada via fertirrigação. Porém, para a variável acumulação de N na parte aérea, além da testemunha também a menor dose de N em cobertura (40 kg ha^{-1}) apresentou desempenho inferior ao do tratamento referência com aplicação da cobertura nitrogenada via solo. Esse resultado é indicativo de que o maior parcelamento do nitrogênio, proporcionado, pela aplicação via água de irrigação favorece o aproveitamento do N pelas plantas de arroz, de forma que a aplicação de doses intermediárias de N (80 kg ha^{-1} de N) via fertirrigação apresenta desempenho equiparável ao do tratamento referência, com aplicação via solo.

O efeito da adubação nitrogenada em cobertura sobre a acumulação de matéria seca nos colmos e folhas (MSCF), nas panículas com grãos (MSPG) e parte aérea da planta de arroz (MSPA) é apresentado nas figuras 11, 12 e 13, respectivamente. Para todas as três variáveis, os resultados obtidos melhor se ajustaram a modelos lineares crescentes, demonstrando a importância do nitrogênio para a acumulação de matéria seca nas plantas de arroz.

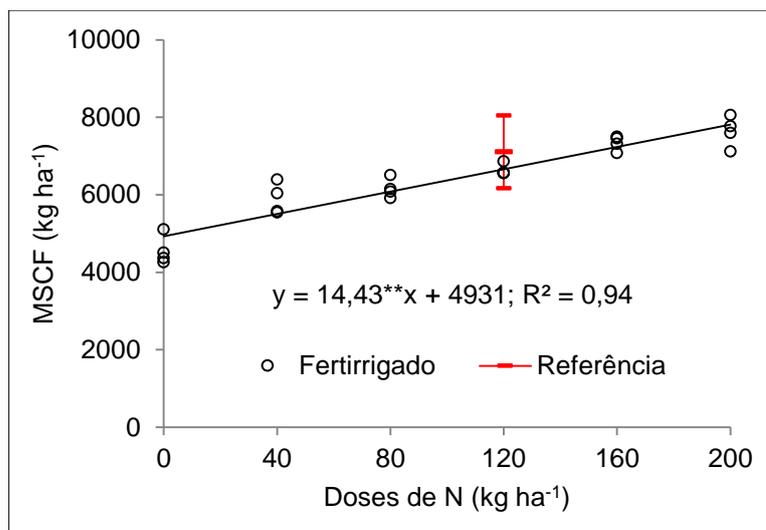


Figura 11 - Massa de matéria seca dos colmos e folhas (MSCF) do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência ** significativo a 1%.

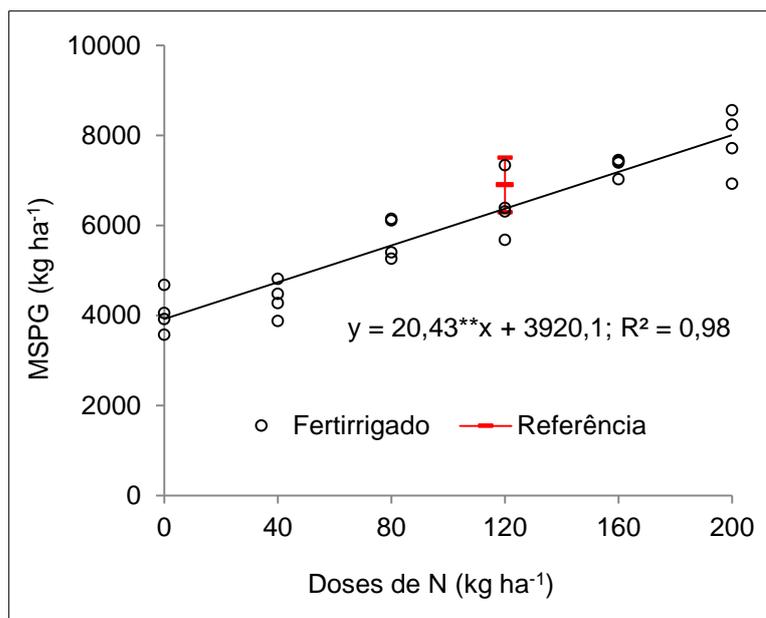


Figura 12 - Massa de matéria seca das panículas com grãos (MSPG) do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

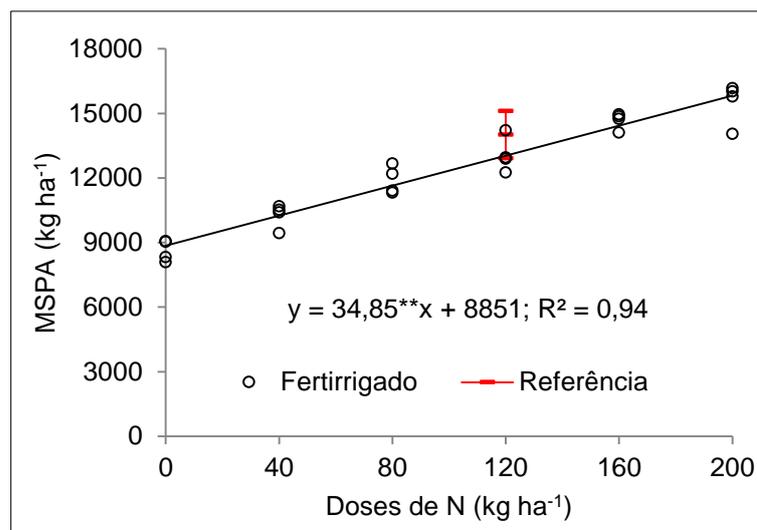


Figura 13 - Massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

A comparação dos coeficientes angulares das equações apresentadas nas figuras 11 e 12 indica superioridade de 42% para a acumulação de matéria seca nos grãos, relativamente à parte aérea. Esses resultados retratam índices de colheita superiores a 50%, o que segundo Guimarães et al. (2008) é indicativo de bom desempenho da cultura.

A equação obtida na Figura 13 mostra, ainda, que para cada quilograma de N aplicado ao arroz houve um incremento em produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz de 34,8 kg ha⁻¹. Silva et al. (2007) e Zhang et al. (2012) também relataram incremento na massa de matéria seca do arroz decorrentes do incremento na dose de nitrogênio; os coeficientes angulares obtidos foram menores quando comparados aos do presente estudo. Um maior incremento de massa de matéria seca da parte aérea é indicativo de uma maior taxa fotossintética, corroborando com o exposto em Takay et al. (2010), maiores doses de N propiciam maiores números de cloroplastos por unidade de área foliar.

Nas figuras 14, 15 e 16 são apresentados, o efeito da dose de nitrogênio aplicada em cobertura sobre a quantidade de N acumulado nos colmos e folhas (NACF), nos grãos (NAPG) e na parte aérea da planta de arroz (NAPA), respectivamente. Os modelos que melhor representaram o comportamento dessas variáveis em função de doses de N foram lineares. Zhang et al. (2012) e Fageria (2014) também tiveram dados ajustados a modelo linear ao estimarem a acumulação de N nos colmos e folhas do arroz. Porém, utilizaram modelos quadráticos para

descrever o efeito do N sobre a acumulação do nutriente nos grãos, indicando que após determinado limite, o aumento na dose de N no meio de cultivo não se reflete em aumento na acumulação do nutriente nos grãos.

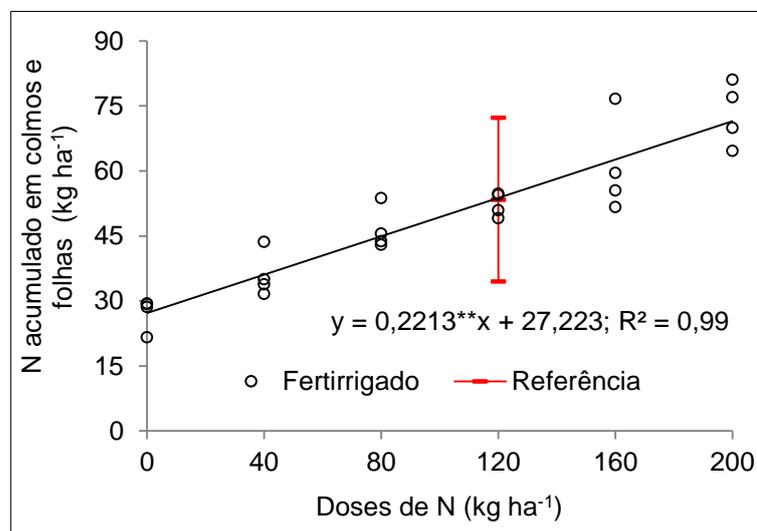


Figura 14 - Nitrogênio acumulado em colmos e folhas de plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 5%.

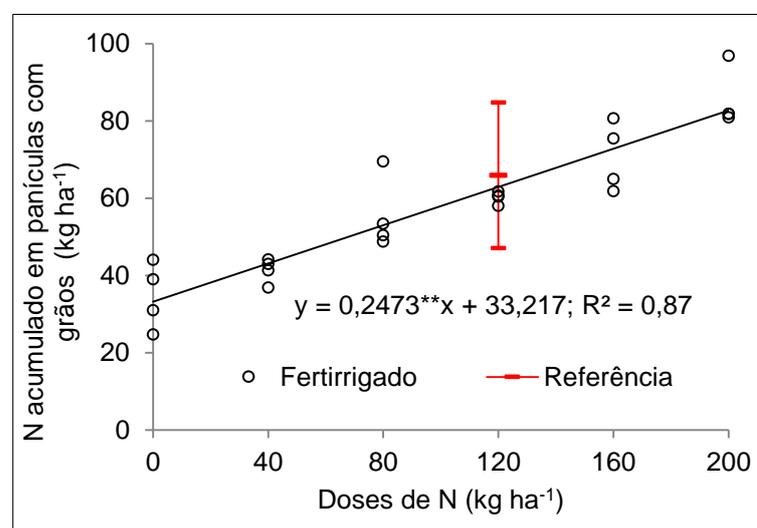


Figura 15 - Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

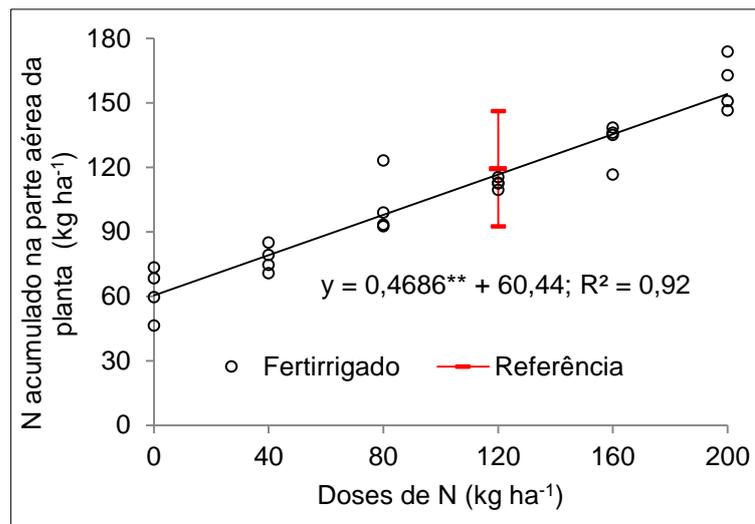


Figura 16 - Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação manual. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

6.3 Experimento 2 – Safra 2013/2014

Neste experimento, a germinação do arroz ocorreu 8 dias após a semeadura, em 10/11/2013, e as adubações nitrogenadas em cobertura (via solo e água de irrigação) foram realizadas em seis datas (Tabela 11), distribuídas ao longo de toda a fase vegetativa, estendendo-se até o início da fase reprodutiva da cultura, correspondendo ao estágio de diferenciação da panícula – R1 (Figura 17). De acordo com o método de graus-dia (STEINMETZ et al., 2015), a diferenciação da panícula para o arroz deveria ter ocorrido cerca de uma semana antes do verificado, confirmando resultados da safra anterior, segundo os quais o arroz produzido em sistema irrigado por aspersão tem seu ciclo biológico estendido em relação ao sistema irrigado por inundação do solo. Essa alteração no ciclo do arroz associada ao sistema de irrigação por aspersão foi minimizada ao longo da fase reprodutiva, visto que a maturação completa dos grãos (estádio R9) ocorreu em 15/03/2014, apenas três dias após ao estimado para a cultivar BRS Pampa pelo método de graus-dia para o local onde foi realizado o presente experimento (STEINMETZ et al., 2015). O aumento no ciclo da cultivar BRS Pampa, observado nesta safra agrícola, é bem menor que o reportado por Pinto (2015), de 12 a 21 dias. Este resultado é indicativo de que a variação na duração média do ciclo biológico do arroz associada ao sistema de irrigação difere entre anos, resultando da interação das condições climáticas, particularmente a temperatura do ar e da disponibilidade de água no solo.

Tabela 11 - Datas e estádios das adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz.

Forma de aplicação	Data de aplicação	DAE	Estádio de desenvolvimento
Adubação via solo	09/12/2013	29	V5
1° Fertirrigação	18/12/2013	38	V7
2° Fertirrigação	27/12/2013	47	V9
3° Fertirrigação	03/01/2014	54	V11
4° Fertirrigação	10/01/2014	61	V12
5° Fertirrigação	17/01/2014	68	R1

DAE- dias após a emergência.



Figura 17 - Planta de arroz aberta em duas seções longitudinais, ilustrando o estágio de diferenciação da panícula (R1), quando foi realizada a 5ª aplicação de nitrogênio, via água de irrigação.

As significâncias do teste de Dunnett, aplicado para contrastar o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, em que o nutriente foi aplicado via solo, são apresentadas na tabela 12. Por compreender dados referentes a variáveis distintas, optou-se pela discussão dos resultados separadamente, de acordo com a sequência em que são apresentados nos subitens: nível de nitrogênio na planta; desempenho agrônomico e produtivo e acumulação de matéria seca e de nitrogênio pela planta de arroz.

Tabela 12 - Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, com aplicação do nutriente via solo; Safra 2013/2014.

Variável	Tratamentos / doses de N aplicado em cobertura (kg ha ⁻¹)				
	Referência/120	T1 / 0	T2 / 80	T3 / 120	T4 / 160
IRC - estádio V7-V8	36,9	34,0 ^{ns}	38,7 ^{ns}	39,5 ^{ns}	40,7*
N folha -estádio V7-V8	3,0	2,9 ^{ns}	3,2 ^{ns}	3,5**	3,4**
IRC - estádio R4	39,0	37,2 ^{ns}	39,0 ^{ns}	40,3 ^{ns}	41,7 ^{ns}
N folha - estádio R4	2,4	2,3 ^{ns}	2,2 ^{ns}	2,4 ^{ns}	2,6 ^{ns}
Estatura de planta	70,1	64,8*	66,4**	65,1*	62,0*
Número de perfilhos	566	649 ^{ns}	567 ^{ns}	544 ^{ns}	534 ^{ns}
Número de panículas	529	498 ^{ns}	499 ^{ns}	450 ^{ns}	463 ^{ns}
Produtividade de grãos	7207	6487 ^{ns}	8434**	9276*	7654 ^{ns}
Esterilidade de espiguetas	12,2	13,6 ^{ns}	11,6 ^{ns}	9,7 ^{ns}	12,1 ^{ns}
Número de espiguetas por panícula	139	118**	148 ^{ns}	124 ^{ns}	105*
Peso de 1000 grãos	23,7	20,0*	21,6**	22,6 ^{ns}	21,6**
Produção de matéria seca dos colmos e folhas	5417	4972 ^{ns}	5994 ^{ns}	7053*	7401*
Produção de matéria seca das panículas com grãos	8033	7977 ^{ns}	8226 ^{ns}	8145 ^{ns}	9540**
Produção de matéria seca da parte aérea	13450	12948 ^{ns}	14220 ^{ns}	15198 ^{ns}	16941*
Nitrogênio acumulado nos colmos e folhas	22	25 ^{ns}	25 ^{ns}	33**	32 ^{ns}
Nitrogênio acumulado nas panículas com grãos	63	68 ^{ns}	68 ^{ns}	74 ^{ns}	71 ^{ns}

*, ** significativo a 5% e 1%.

6.3.1 Níveis de nitrogênio na planta

Com relação às variáveis indicadoras do nível de nitrogênio na planta de arroz, a comparação dos tratamentos com aplicação de nitrogênio via água de irrigação, relativamente ao tratamento referência, onde o nutriente foi aplicado via solo, evidenciou diferenças apenas na primeira época de avaliação (fase vegetativa – estágio V7-V8). Na avaliação realizada na fase reprodutiva (floração), não houve diferença entre os tratamentos referência e com aplicação de N via água de irrigação, independentemente da dose de N aplicada em cobertura (Tabela 12). Na avaliação realizada em V7/V8, apenas o IRC na folha do tratamento com aplicação da maior dose de N (T4 – 160 kg ha⁻¹) distinguiu-se daquele medido no tratamento referência, sendo 10% superior ao tratamento 4. Para a variável teor de N na folha, esse comportamento foi observado, também, para a dose de 120 kg ha⁻¹ de N, ou seja, para as duas maiores doses do nutriente aplicadas ao arroz via fertirrigação (120 e 160 kg ha⁻¹). Para ambas as variáveis, determinou-se superioridade da aplicação do N via fertirrigação em relação à aplicação via solo. Esse resultado indica que, na fase vegetativa, o nível de N na planta de arroz foi influenciado pela dose do nutriente aplicada ao solo, havendo, ainda, algum benefício devido à forma de aplicação, que foi ligeiramente superior quando decorrente da aplicação via água de irrigação.

Com relação ao efeito da dose de N aplicado via fertirrigação, em ambas as fases (vegetativa – estágio V7/V8 e reprodutiva – estágio R4), avaliou-se o efeito dos tratamentos sobre o índice relativo de clorofila na folha (Figuras. 18 e 19). Com relação ao teor foliar de N, o efeito dos tratamentos restringiu-se à avaliação realizada na fase vegetativa (Figura 20).

O teor de N na folha bandeira foi de 2,42%, estando dentre os valores publicados por Fageria et al. (2007) e dentro da faixa de suficiência da Sociedade.(2004).

Na fase vegetativa (V7-V8), o aumento na dose de N promoveu efeito direto sobre o IRC e teor foliar de N no arroz (Figuras. 18 e 19). Santos et al. (2011) e Avila et al. (2010) constataram correlação direta entre o IRC e o teor de N na folha de arroz, inferindo ser possível estimar com uma precisão aceitável o teor de N na folha a partir de medidas do IRC.

É importante ressaltar que no momento das avaliações apenas 40% de nitrogênio havia sido aplicado a cada tratamento, todavia a quantidade de fertilizante

utilizada foi proporcional à dose total prevista para todos os tratamentos. Os valores médios de IRC e N foliar no estágio V7-V8, variaram de 35,0 a 41,2 e 2,9% a 3,5%, respectivamente. Os valores de N foliar determinados no presente estudo são superiores aos encontrados por Avila et al. (2010) (1,2% a 2,4%), ao trabalharem com arroz produzido em solução nutritiva.

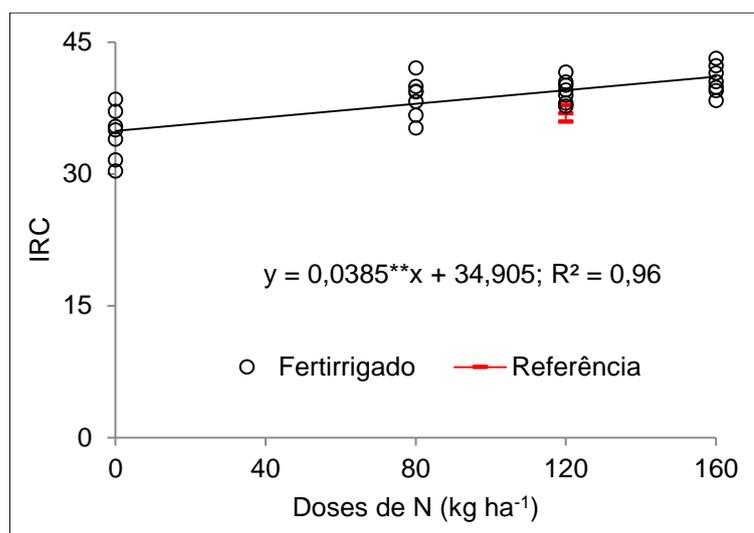


Figura 18 - Índice relativo de clorofila (IRC) na folha índice do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Avaliação realizada no estágio de sete a oito folhas (V7-V8). Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

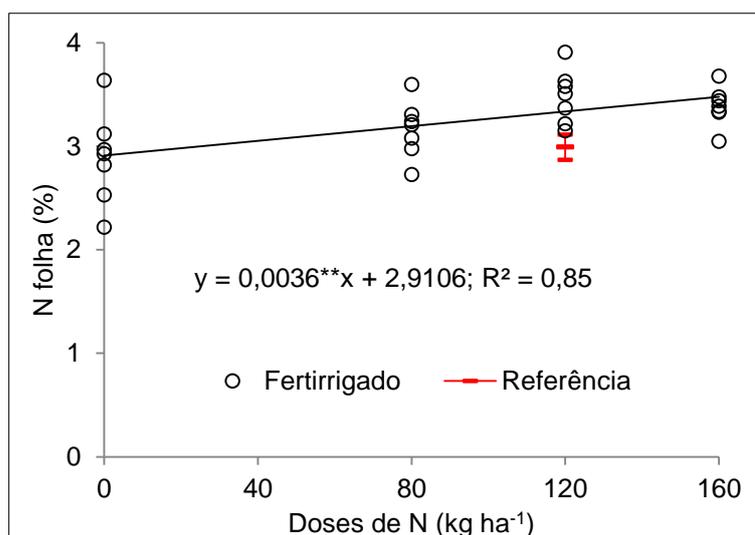


Figura 19 - Teor de nitrogênio na folha índice do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Avaliação realizada no estágio de sete a oito folhas (V7-V8). Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

Bevilacqua et al. (2015), ao trabalharem com três cultivares de arroz de sequeiro e seis cultivares de arroz irrigado, encontraram diferenças entre os genótipos

quanto aos teores foliares de clorofila; os maiores teores de clorofila foram determinados para as cultivares de arroz irrigado, sugerindo que essas cultivares apresentam maior absorção e/ou eficiência de uso do N. O índice de clorofila nas folhas apresenta alta correlação com o teor de N da planta, sendo, por essa razão, um método eficiente para a avaliar a adequação do estado nutricional das plantas quanto ao N (BARBIERI JUNIOR, 2009; POCOJESKI, 2007; ARGENTA et al., 2001).

Na figura 20 é apresentado o efeito da adubação nitrogenada em cobertura sobre o índice relativo de clorofila (IRC) na folha do arroz, avaliada por ocasião da floração plena. Também nesta época, determinou-se efeito linear direto do aumento na dose de N sobre os valores de IRC no arroz.

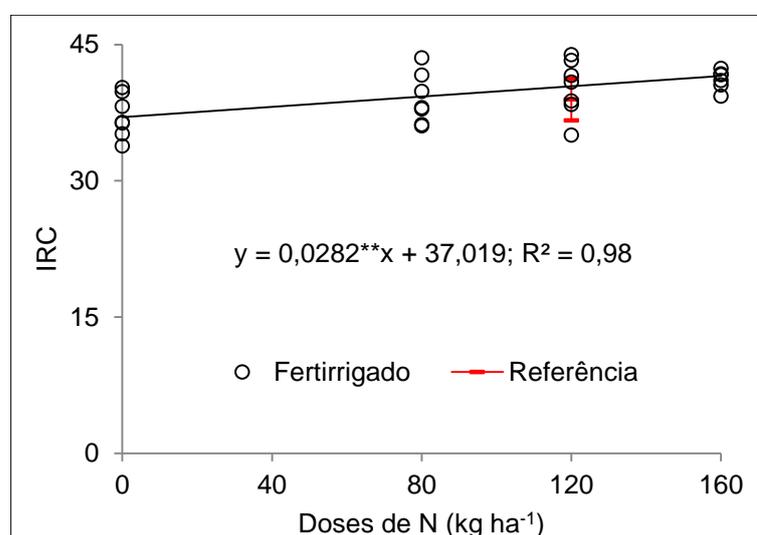


Figura 20. Índice relativo de clorofila (IRC) na folha bandeira do arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Avaliação realizada na floração plena (estádio R4). Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

A ausência de efeito dos tratamentos de dose de N sobre o teor foliar do nutriente na planta de arroz na floração contrapõe-se a observações de Santos et al. (2011) e Pcojeski et al. (2012), que estabeleceram correlação positiva entre o teor de nitrogênio na folha de arroz e o IRC, em diferentes fases do ciclo fenológico da cultura.

A comparação das equações apresentadas nas figuras 18 e 20 mostra que o coeficiente angular da equação da figura 18 é superior ao da figura 20, isso mostra que para uma mesma dose de N aplicado existe um maior incremento de clorofila nas folhas de arroz na fase vegetativa do que na reprodutiva. Explica-se esse efeito em

razão de na fase reprodutiva ocorrer translocação intensa do nutriente para os órgãos reprodutivos.

6.3.2 Desempenho agrônômico e produtivo do arroz

A comparação do desempenho do tratamento referência, com adubações nitrogenadas em cobertura via solo, relativamente àqueles com fertirrigação indicou diferenças para as variáveis estatura de planta, produtividade de grãos, número de espiguetas por panícula e peso de 1000 grãos, não havendo diferença entre os tratamentos com adubação via solo e via fertirrigação sobre o número de perfilhos e de panículas (Tabela 12).

O tratamento referência proporcionou plantas de maior estatura do que aqueles em que o N foi fornecido via fertirrigação. As diferenças observadas variaram de 5,2%, para a dose de 80 kg ha⁻¹ de N, a 11,5%, para a dose de 160 kg ha⁻¹ de N. Quanto à variável número de espiguetas por panícula, o desempenho do tratamento referência foi 18% e 32% superior aos tratamentos com omissão da adubação nitrogenada em cobertura e com a aplicação de 160 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Para a variável peso de 1000 grãos, o desempenho do tratamento referência foi semelhante, apenas para a dose de 120 kg ha⁻¹ de N, tendo superado todas as demais doses; a amplitude das variações observadas variou de 9% a 18% em relação ao tratamento referência.

Por outro lado, o maior parcelamento da cobertura nitrogenada, proporcionado pela técnica de fertirrigação, promoveu maior produtividade do arroz adubado com 80 e 120 kg ha⁻¹ de N, relativamente ao tratamento referência, indicando benefício do maior parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura sobre o desempenho produtivo do arroz.

Quanto à análise de regressão, todos os termos das equações estimadas para descrever o comportamento das variáveis número de perfilhos e panículas, e esterilidade de espiguetas em função de doses de N, não apresentaram significância ($P \geq 0,05$). A média geral das variáveis números de perfilhos, panículas e espiguetas por panículas foram de 572, 488 e 127 respectivamente. Por sua vez a média geral da esterilidade de espiguetas foi de 11,8%.

Na figura 21 é apresentado o efeito da dose de nitrogênio aplicado via fertirrigação sobre a estatura das plantas de arroz. Os resultados obtidos foram melhor descritos pelo modelo quadrático, com valor máximo de 67 cm, correspondente à

aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N. Independentemente da dose de N aplicada, as plantas apresentaram estatura próximas e compatíveis com o porte médio da cultivar BRS Pampa. Esse é um efeito desejável, visto que plantas de estatura mais elevada apresentam maior tendência ao acamamento (ARF et al. 2015). Fabre et al. (2011) e Hernandez et al. (2010) reportaram comportamento quadrático semelhante da estatura de planta de arroz em resposta a doses de N, ao trabalharem com uma cultivar de arroz de terras altas. Por outro lado, Mauad et al. (2003) verificaram redução na estatura de plantas de arroz, decorrente do aumento na dose de N utilizada na adubação. Essa distinção de comportamento indica que o efeito do N sobre a estatura do arroz é função da interação de diversos fatores, particularmente a luminosidade, temperatura, umidade e teor de matéria orgânica presente no solo (MATTJE et al., 2013; VOGEL et al., 2013).

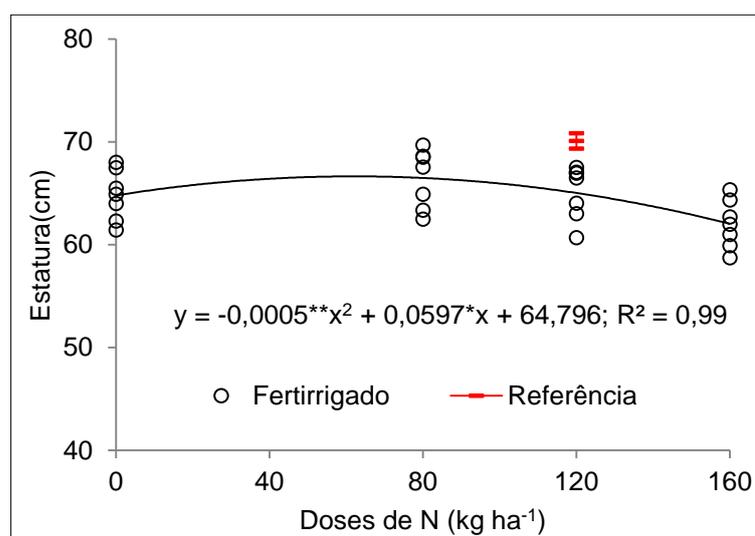


Figura 21 - Estatura de plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; *, ** significativo a 5% e 1%.

O efeito da variação na dose de nitrogênio em cobertura sobre a produtividade do arroz ajustou-se a um modelo quadrático (Figura 22), corroborando resultados descritos por Fageria et al. (2007) e Fabre et al. (2011). A partir da equação ajustada, determinou-se a dose de máxima eficiência técnica (DMET), a qual correspondeu à aplicação de 97 kg ha⁻¹ de N, proporcionando produtividade de 8.900 kg ha⁻¹. Silva et al. (2007) e Rhine et al. (2011) também determinaram resposta quadrática da produtividade do arroz à variação na dose de N. Os valores de DMET determinados

por esses autores variaram de 100 a 170 kg ha⁻¹ de N, que proporcionaram produtividades de 5.556 a 8.227 kg ha⁻¹.

Por sua vez, a dose de máxima eficiência econômica (DMEE), calculada com base nos preços descritos na metodologia, foi de 90 kg ha⁻¹ de N, proporcionando uma produtividade de 8.885 kg ha⁻¹. Existe certa unanimidade de que a DMEE é aproximadamente 90% da MET (PRIMAVESI et al., 2005), todavia a manutenção dessa relação depende da constância da proporcionalidade entre os preços do fertilizante e da saca de arroz, condição que não vem ocorrendo nas ultimas safras; o preço do fertilizante aumentou 50% enquanto o do produto (arroz) aumentou, apenas, 32% (CONAB, 2015).

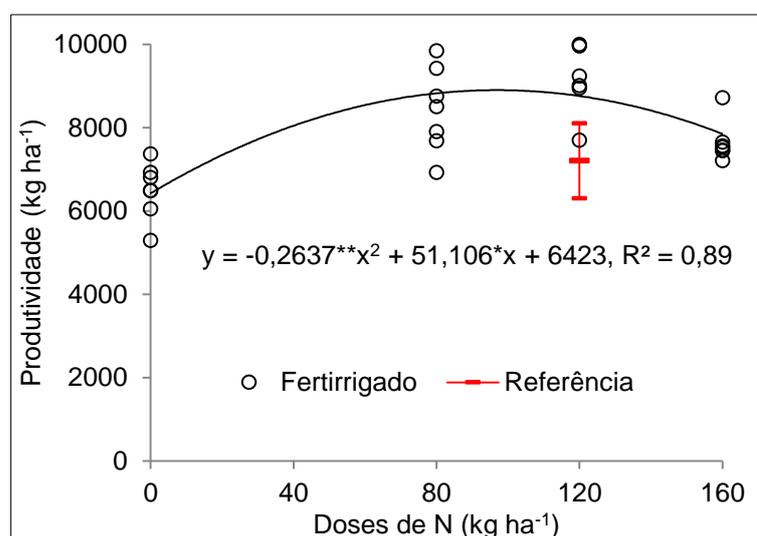


Figura 22 - Produtividade de grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

A diferença na produtividade de grãos existente entre a presente safra e a do experimento 1 é atribuída a fatores associados ao manejo da cultura, particularmente da irrigação, que nesta safra foi realizada sob tensão média de água no solo menor, reduzindo o risco de déficit hídrico, conforme descrito na metodologia do trabalho, bem como a condições ambientais distintas decorrentes da variação na época de semeadura do arroz.

Artigiani et al. (2014) avaliaram o efeito da combinação dos fatores dose de N em cobertura (0, 30, 60, 90 kg ha⁻¹) e a presença ou não de irrigação por aspersão no desempenho produtivo de arroz de terras altas, tendo determinado resposta crescente à adubação nitrogenada apenas em presença de irrigação por aspersão.

Na figura 23 é apresentado o efeito da adubação nitrogenada sobre essa variável número de espiguetas por panícula, o qual foi ajustado a um modelo quadrático, com valor máximo de 144 espiguetas por panícula, obtido com a aplicação de 70 kg ha⁻¹ de N.

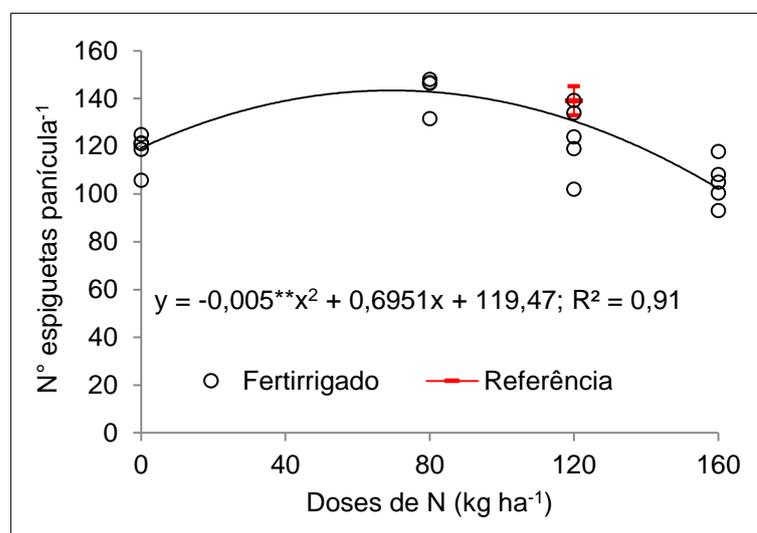


Figura 23 - Número de espiguetas por panícula de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; *, ** significativo a 5% e 1%.

O número de espiguetas por panículas é um dos componentes da produtividade do arroz, sendo estabelecido cerca de 10 dias antes da floração (LOPES; LIMA, 2015), época em que todo o N previsto nos tratamentos já havia sido fornecido ao arroz, tendo, pois, contribuído para o incremento dessa variável.

Na figura 24 é apresentado o efeito da adubação nitrogenada sobre o peso de 1000 grãos do arroz. A variável foi ajustada a modelo linear crescente, indicando não se ter atingido valor máximo para a mesma, dentro do intervalo de doses avaliado. Esses resultados corroboram com aqueles obtidos por Fabricio et al. (2006), que avaliaram a resposta da cultivar de sequeiro (BRS Piracema) à aplicação de sete doses de N, parcelado em duas aplicações aos 20 e 40 DAE. O peso de mil grãos é um dos principais constituintes da produtividade do arroz (FAGERIA, 2014), tendo forte influência genética. O estabelecimento da massa nos grãos ocorre na fase reprodutiva, entre os estádios R5 e R7, período em que já havia sido aplicado todo o N previsto nos tratamentos, de forma que, independentemente da dose aplicada, toda a reserva da planta pôde ser direcionada ao incremento no conteúdo de amido, que

constitui 90% da massa dos grãos (LARCHER, 1995), bem como de seus demais constituintes (SOSBAI, 2012).

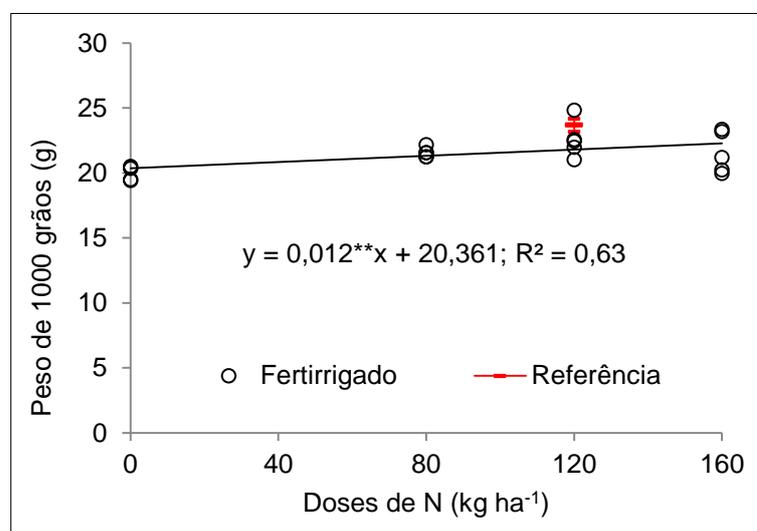


Figura 24 - Peso de 1000 grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

6.3.3 Acumulação de matéria seca e de nitrogênio na planta de arroz

O contraste do efeito dos tratamentos com fertirrigação nitrogenada para o arroz, relativamente ao tratamento referência, com aplicação do nutriente via solo, indicou diferenças para as variáveis produção de matéria seca dos colmos e folhas, das panículas com grãos e da parte aérea, bem como para a variável nitrogênio acumulado nos colmos e folhas. Apenas para a variável N acumulado nos grãos não se determinou distinção entre os tratamentos (Tabela 12).

Os tratamentos com a aplicação das duas maiores doses de N (120 e 160 kg ha⁻¹) proporcionaram maior acumulação de matéria seca nos colmos e folhas relativamente ao tratamento referência; o incremento determinado foi expressivo, correspondendo, respectivamente, a 30% e 37%. Comportamento semelhante foi determinado para as variáveis produção de matéria seca das panículas com grãos e produção de matéria seca da parte aérea, porém exclusivamente para a maior dose de N (160 kg ha⁻¹), que proporcionou respectivamente, aumentos de 19% e 26% em relação ao tratamento referência (Tabela 12). Esses resultados mostram que o principal fator determinante do aumento da produção de matéria seca nas plantas de

arroz foi a dose de N aplicado, exercendo efeito preponderante ao do parcelamento e forma de aplicação do nutriente.

Com relação à acumulação de nitrogênio na planta de arroz, diferenças entre o tratamento referência e os demais, envolvendo fertirrigação, foram observadas exclusivamente para a variável N acumulado nos colmos e folhas, na dose de 120 kg ha⁻¹ de N, cujo efeito foi 50% superior ao do tratamento referência (Tabela 12).

O valor médio da variável produção de matéria seca das panículas foi de 8.384 kg ha⁻¹, todavia não houve efeito da variação na dose de N em cobertura sobre essa variável. A variação na dose de N influenciou, porém, a produção de matéria seca dos colmos e folhas e da parte aérea das plantas. O modelo que melhor descreveu o comportamento de ambas as variáveis (MSCF e MSPA), em função da variação na dose de N, foi o linear. O acúmulo de matéria seca nos colmos e folhas e na parte aérea das plantas de arroz aumentou proporcionalmente à dose de N aplicada (Figuras. 25 e 26). Esse resultado demonstra a importância do suprimento adequado de N no meio de cultivo sobre a produção de matéria seca do arroz. Comportamento semelhante seria esperado para a variável produção de matéria seca dos grãos, o que possivelmente se deva ao elevado coeficiente de variação dos dados obtidos.

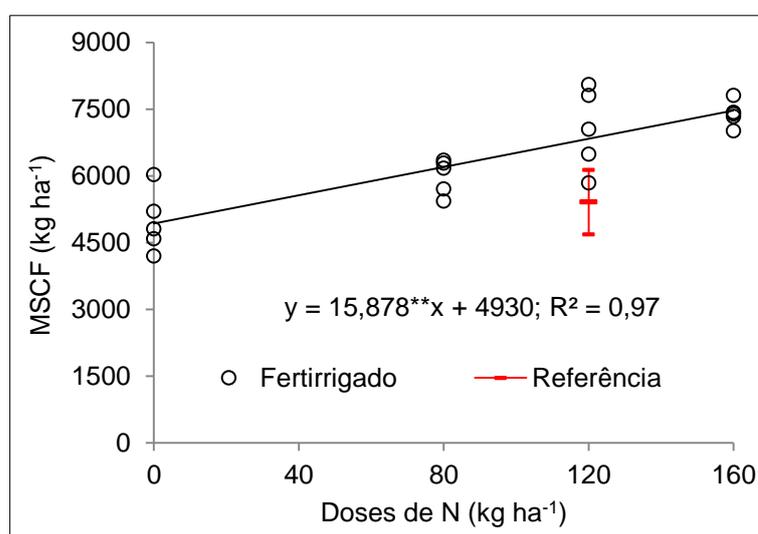


Figura 25 - Produção de matéria seca dos colmos e folhas (MSCF), em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

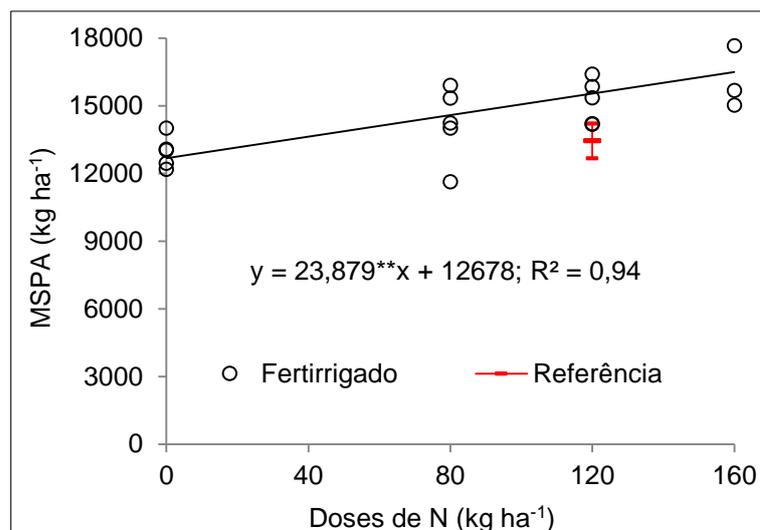


Figura 26 - Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz (MSPA), em função da dose de nitrogênio aplicada em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

As variações determinadas para os resultados de produção de matéria seca da parte aérea confirmam observações de Fageria (2014), para cultivares de arroz de sequeiro adubadas com 8 doses de N (zero a 210 kg ha⁻¹ de N), que encontrou relação linear crescente entre a produção de matéria seca da parte aérea e as doses de N, com um coeficiente de determinação de 0,96.

Não foi observado o efeito da adubação nitrogenada em cobertura sobre as variáveis N acumulado nos colmos e folhas, nas panículas com grãos e na parte aérea da planta e a média dessas variáveis foi 27,3 kg ha⁻¹, 68,6 kg ha⁻¹ e 95,9 kg ha⁻¹, respectivamente. Esse resultado possivelmente foi devido ao campo estar em pousio por um longo tempo e a variação espacial de umidade do solo influência diretamente nas perdas de N no sistema solo-planta-atmosfera.

6.3.4 Eficiência no uso do nitrogênio pela planta de arroz

Os resultados de recuperação aparente do nitrogênio, eficiência agrônômica de uso do nitrogênio e eficiência fisiológica de uso do nitrogênio são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Recuperação aparente de nitrogênio (RAN), eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) e eficiência fisiológica de uso do nitrogênio (EFUN) das plantas de arroz.

Tratamento	RAN	EAUN	EFUN
	%	kg kg ⁻¹	kg kg ⁻¹
Referência	11,5	10,1	52,5
T2	21,1	24,3	142,9
T3	20,0	23,2	94,8
T4	21,9	7,3	82,5

Referência- Dose de 120 kg.ha⁻¹ de N, sendo 50 kg aplicados no estádio V4 e 70 kg aplicados no estádio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T2, T3 e T4 – respectivas doses de adubação nitrogenada em cobertura de 80, 120 e 160 kg.ha⁻¹, sendo 25% aplicada em V4 via solo e o restante parcelado em cinco aplicações via fertirrigação, com frequência semanal.

Os dados da tabela 13 mostram que maior contraste entre os tratamentos foi determinado para a variável EAUN, com destaque para o tratamento T2, que propiciou uma RAN de 21,1%, um incremento de 24,3 kg em produtividade para cada quilograma de N utilizado e o incremento de um kg na parte aérea da planta proporcionou a elevação de 142,9 kg de matéria seca na parte aérea da planta, quando comparado a testemunha. Qin et al. (2013), trabalhando com genótipos de arroz desenvolvidos para terras altas, obtiveram a mesma tendência de redução da EAUN com o aumento da dose de N fornecidas à cultura.

Fageria et al. (2007), ao avaliarem o efeito de cinco doses de N, parcelado 50% na semeadura e 50% aos 45 dias após a emergência, sobre o desempenho de cultivares de arroz de sequeiro, determinaram valores médios de 29% de RAN, 19 kg kg⁻¹ de EAUN e 155 kg kg⁻¹ de EFUN.

A comparação entre os tratamentos indica que o tratamento referência, com a aplicação de N via solo, apresentou desempenho inferior àqueles em que a cobertura nitrogenada foi realizada via fertirrigação, exceção feita para a variável EAUN na dose de 160 kg ha⁻¹. Os valores médios de eficiência do nitrogênio determinados para o tratamento referência, particularmente para a variável RAN, são inferiores aos descritos em vários outros estudos (20% e 45%) (DOBERMANN, 2007; FAGERIA et al., 2007; BORIM, 2014; LADHA et al., 2016). A menor eficiência no uso do N observada no presente estudo possivelmente se deva ao fato de o experimento ter sido instalado em uma área previamente em pousio e com alta infestação de plantas daninhas, de difícil controle em sistema de produção irrigado por aspersão.

Vale acrescentar que, de forma geral, o sucesso no cultivo de arroz irrigado por aspersão é normalmente alcançado após alguns anos de implementação do sistema, que necessariamente deve incluir sistema de rotação/sucessão de culturas, condição

que é favorável à produtividade da cultura, refletindo-se no aumento na eficiência de uso de nitrogênio.

6.3.5 Concentração de amônio e nitrato na solução do solo

O efeito das adubações nitrogenadas em cobertura sobre as concentrações do íon amônio (N-NH_4^+) na solução do solo ao longo do tempo é apresentado na tabela 14. De forma geral, não se observou diferença entre os tratamentos quanto aos teores de amônio na solução do solo nas quatro coletas realizadas. Exceção a esse comportamento foi determinada na primeira coleta (47 DAE), quando o desempenho do tratamento em que foram aplicados 120 kg ha^{-1} de N, via fertirrigação, foi inferior ao dos demais. Possivelmente esse resultado esteja associado a algum efeito local momentâneo, visto se tratar de um evento único, sem relação com a dose de N aplicada, não se repetindo nas demais épocas de avaliação.

A ausência de variação nos teores de amônio na solução do solo entre os tratamentos é atribuída a baixa disponibilidade de N mineral no solo, devido ao parcelamento das doses, de forma que a maior parte do N aportado ao solo é rapidamente absorvido pelas plantas de arroz, ainda na forma amoniacal, ou convertido a forma nítrica, dada à condição vigente de solo drenado. Em solos oxidados, os microrganismos nitrificadores são responsáveis pela conversão do nitrogênio amoniacal a nitrato (CANTARELLA, 2007).

Tabela 14 - Teor de amônio (NH_4^+) na solução do solo de área cultivada com arroz irrigado por aspersão, em função do manejo da adubação nitrogenada.

Tratamento	N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹) / Época de coleta (DAE)			
	47	54	61	68
Referência	3,52a	0,42a	0,35a	0,92a
T1	2,54a	2,45a	0,19a	0,24a
T2	3,44a	1,27a	0,83a	0,39a
T3	1,38b	1,19a	0,76a	0,25a
T4	4,09a	0,73a	0,77a	0,48a
CV (%)	35,0	64,0	50,0	61,0

Referência – Dose de $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N, sendo 50 kg aplicados no estágio V4 e 70 kg aplicados no estágio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T1 – Testemunha com omissão de adubação nitrogenada em cobertura; T2, T3 e T4 – respectivas doses de adubação nitrogenada em cobertura de 80, 120 e $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, sendo 25% aplicada em V4 via solo e o restante parcelado em cinco aplicações via fertirrigação.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ainda da tabela 14, destaca-se o fato de os teores de amônio presentes na solução do solo diminuírem ao longo do tempo, refletindo, particularmente, o aumento na demanda do nutriente a medida que a planta de arroz se desenvolve. Embora o arroz absorva nitrogênio durante todo o seu ciclo, as exigências são maiores nas fases de perfilhamento e reprodutiva. Todavia, é nesta última, que se inicia com a diferenciação da panícula, que a planta apresenta maior eficiência na absorção de N para a produção de grãos, uma vez que o sistema radicular se encontra mais desenvolvido e, conseqüentemente, com maior potencial de absorção de nutrientes (LOPES, 1990; MACHADO, 1993). Borin (2014), avaliando a cultivar de arroz irrigado IRGA 424 sob irrigação contínua a intermitente e adubada com 150 kg ha⁻¹ de N parcelados em 2 ou 3 aplicações, também observou redução nos teores de amônio na solução do solo ao longo do período de cultivo do arroz. Todavia os valores medidos de concentração de NH₄⁺ na solução do solo foram bastante superiores ao do presente estudo (10 a 35 mg L⁻¹), em razão da condição de solo reduzido.

O efeito das adubações nitrogenadas em cobertura sobre os teores de nitrato na solução do solo ao longo do tempo é apresentado na tabela 15. Assim como para o íon amônio, os teores de nitrato na solução do solo não se diferenciaram entre os tratamentos de manejo da adubação nitrogenada para o arroz nas quatro coletas realizadas. Embora o nitrato seja a forma mineral de N predominante em solos oxidados, as concentrações medidas do íon foram bastante baixas em todas as épocas de avaliação, com tendência de redução ao longo do período de cultivo do arroz, também refletindo a demanda crescente e maior eficiência na absorção de N das plantas de arroz, a medida que se aproximam da fase reprodutiva (LOPES, 1990; MACHADO, 1993). É possível, ainda, que a profundidade de amostragem da solução do solo utilizada não tenha sido adequada para caracterizar o conteúdo de nitrato em solução, em razão de sua elevada suscetibilidade a perdas por lixiviação. Bortolotto et al. (2012), ao avaliarem o efeito da aplicação de doses elevadas de N (até 600 kg ha⁻¹) ao cafeeiro, no Oeste da Bahia, encontraram elevações nos teores de NO₃⁻ ao longo do tempo e associaram a lixiviação desse íon à intensidade elevada de eventos de precipitação e de irrigação. Por sua vez, Coelho et al. (2014) estudaram o efeito de fontes e doses de nitrogênio, aplicado via fertirrigação, em cultivo de bananeira, sobre a concentração de nitrato na solução do solo, verificando diminuição na concentração do íon até a profundidade 60 cm.

Tabela 15 - Teor de nitrato (NO_3^-) na solução do solo de área cultivada com arroz irrigado por aspersão, em função do manejo da adubação nitrogenada. Avaliações realizadas em quatro épocas.

Tratamento	N- NO_3^- (mg L ⁻¹) / Época de coleta (DAE)			
	47	54	61	68
Referência	1,9a	0,8a	0,8a	0,3a
T1	2,6a	2,0a	-	0,2a
T2	1,7a	0,5a	0,2a	0,2a
T3	2,7a	0,7 ^a	0,3a	0,3a
T4	1,9a	0,4a	0,1a	0,4a
CV (%)	21,0	78,0	92,0	23,0

Referência – Dose de 120 kg·ha⁻¹ de N, sendo 50 kg aplicados no estágio V4 e 70 kg aplicados no estágio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T1 – Testemunha com omissão de adubação nitrogenada em cobertura; T2, T3 e T4 – respectivas doses de adubação nitrogenada em cobertura de 80, 120 e 160 kg·ha⁻¹, sendo 25% aplicada em V4 via solo e o restante parcelado em cinco aplicações via fertirrigação.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

6.4 Experimento 2 – Safra 2014/2015

A germinação do arroz ocorreu 19 dias após a semeadura, em 12/11/2014. Quanto às fertirrigações, essas foram realizadas em seis datas (Tabela 16), distribuídas nas fases vegetativa e reprodutiva do arroz.

Tabela 16 - Datas e estádios das coletas de um metro linear do arroz irrigado por aspersão.

Aplicações de ureia	Data	DAE	Estádio
1º Fertirrigação	06/12/14	25	V4-V5
2º Fertirrigação	19/12/14	38	V7-V8
3º Fertirrigação	30/12/14	49	V10-V11
4º Fertirrigação	13/01/15	65	R1
5º Fertirrigação	27/01/15	77	R2
6º Fertirrigação	11/02/15	92	R4

DAE – Dias após a emergência.

A tabela 16 mostra que as fertirrigações estenderam-se até a fase reprodutiva (estádio R4); a última fertirrigação com nitrogênio foi realizada 92 dias após a emergência (DAE), coincidindo com a floração do arroz. A colheita ocorreu em 15/03/2015, indicando que o cultivo no sistema irrigado por aspersão estendeu a duração do ciclo médio da cultivar utilizada, BRS Pampa (118 dias), em 6 dias, em relação ao sistema de cultivo irrigado por inundação do solo (SOSBAI, 2014). O alongamento do ciclo é um comportamento usualmente observado quando do cultivo de cultivares de arroz desenvolvidas para o sistema irrigado por inundação no sistema irrigado por aspersão.

As significâncias do teste de Dunnett, aplicado para contrastar o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, em que o nutriente foi aplicado via solo são apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 - Significância do teste de Dunnett, contrastando o efeito dos tratamentos com aplicação de nitrogênio em cobertura para o arroz, via fertirrigação, frente ao tratamento referência, com aplicação do nutriente via solo; Safra 2014/2015.

Variável	Tratamento/dose de N aplicado em cobertura, via fertirrigação (kg ha ⁻¹)					
	Ref./120	T1/0	T2/80	T3/120	T4/160	T5/200
IRC - estágio V7-V8	35,0	28,2**	30,6**	30,0**	31,6**	30,2**
N folha - estágio V7-V8 (%)	4,4	2,6**	2,8**	2,7**	2,9**	2,6**
IRC - estágio R4	37,0	32,0*	40,8	39,1 ^{ns}	40,5 ^{ns}	40,2 ^{ns}
N folha - estágio R4 (%)	1,9	1,4**	1,3**	1,4**	1,4**	1,4**
Estatura de planta (cm)	71,9	66,0**	70,9 ^{ns}	68,8 ^{ns}	70,3 ^{ns}	68,9 ^{ns}
Número de perfilhos (N° m ⁻²)	447	398 ^{ns}	373 ^{ns}	502 ^{ns}	458 ^{ns}	592 ^{ns}
Número de panículas (N° m ⁻²)	299	320 ^{ns}	293 ^{ns}	407 ^{ns}	370 ^{ns}	426*
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	5317	3870**	6391**	7025**	5472 ^{ns}	6484**
Esterilidade de espiguetas (%)	11,9	14,5 ^{ns}	9,9 ^{ns}	10,1 ^{ns}	10,0 ^{ns}	12,3 ^{ns}
Número de espiguetas por panícula	86	71**	73*	73*	71**	79 ^{ns}
Peso de 1000 grãos (g)	21,4	21,0 ^{ns}	22,0 ^{ns}	22,5 ^{ns}	22,8*	23,6**
Rendimento de grãos inteiros (%)	65,8	63,1**	63,6**	65,2 ^{ns}	65,0 ^{ns}	65,2 ^{ns}
Produção de matéria seca nos colmos e folhas (kg ha ⁻¹)	6463	4813**	5668 ^{ns}	5887 ^{ns}	6078 ^{ns}	5986 ^{ns}
Produção de matéria seca nas panículas (kg ha ⁻¹)	3729	3576 ^{ns}	3538 ^{ns}	4242 ^{ns}	3954 ^{ns}	4298 ^{ns}
Produção de matéria seca na parte aérea (kg ha ⁻¹)	10192	8388 ^{ns}	9206 ^{ns}	10075 ^{ns}	10033 ^{ns}	10287 ^{ns}
Nitrogênio acumulado nos colmos e folhas (kg ha ⁻¹)	45	25**	38 ^{ns}	35 ^{ns}	38 ^{ns}	40 ^{ns}
Nitrogênio acumulado nos grãos (kg ha ⁻¹)	35	33 ^{ns}	35 ^{ns}	38 ^{ns}	38 ^{ns}	43 ^{ns}
Nitrogênio acumulado na parte aérea (kg ha ⁻¹)	79	58**	74 ^{ns}	76 ^{ns}	76 ^{ns}	83 ^{ns}

*, ** significativo a 5% e 1%.

6.4.1 Níveis de nitrogênio na planta

Nas figuras 27 e 28 são apresentados, respectivamente, o efeito da dose de nitrogênio aplicada em cobertura sobre o índice relativo de clorofila (IRC) e teor de nitrogênio na folha índice do arroz, determinados no estágio de sete a oito folhas (V7-V8). Muito embora nessa ocasião somente duas das seis aplicações de nitrogênio em cobertura programadas tivessem sido realizadas, o aumento na dose de N influenciou ambas as variáveis. Carvalho et al. (2012) relataram correlação direta entre IRC e o teor de nitrogênio na folha. O IRC na folha aumentou linearmente com a dose de N aplicado em cobertura via fertirrigação. Por sua vez, a variação no teor foliar de nitrogênio foi descrita por modelo quadrático, com valor máximo de 2,82%, correspondente à aplicação de 107 kg ha⁻¹ N. Esse comportamento corrobora resultados de Avila et al. (2010), ao avaliarem o efeito da aplicação de doses de N em solução nutritiva na cultura do arroz encontraram um efeito quadrático desta variável em função das concentrações de N.

Pocojeski et al. (2012), trabalhando com seis cultivares de arroz em sistema irrigado por inundação do solo, determinaram, nessa fase de desenvolvimento da planta de arroz, concentrações foliares de N variando de 2,2 a 3,8%.

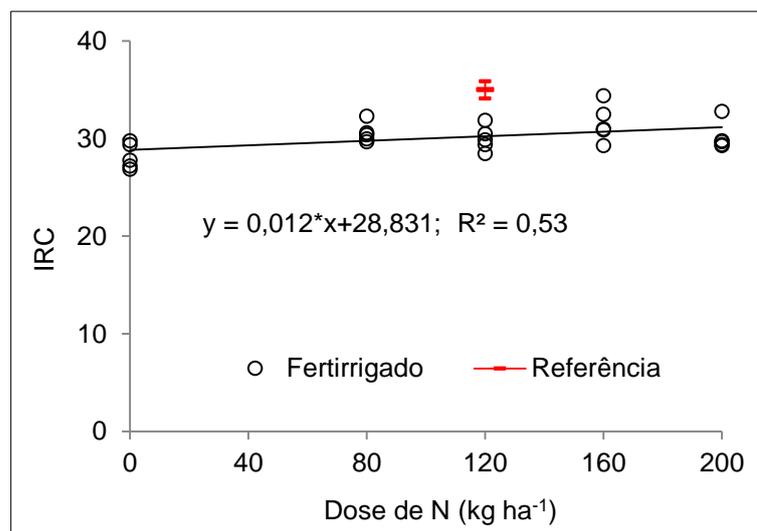


Figura 27 - Índice relativo de clorofila (IRC) na folha índice do arroz, no estágio V7-V8, em função da dose de nitrogênio aplicada em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; * significativo a 5%.

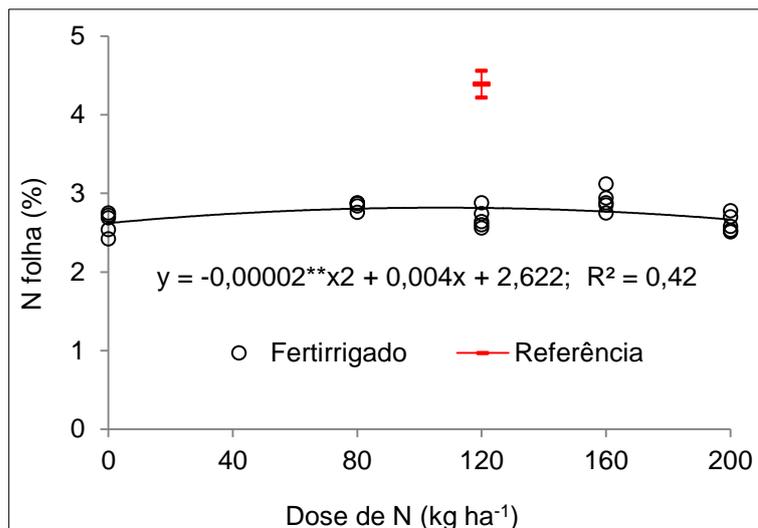


Figura 28 - Teor de nitrogênio na folha índice do arroz, no estágio V7-V8, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

Na avaliação realizada por ocasião da floração plena, quando todo o nitrogênio previsto para aplicação em todos os tratamentos avaliados já havia sido aplicado, efeito da dose de N em cobertura foi determinado, apenas, para a variável IRC. A variação observada foi melhor descrita por modelo quadrático, segundo o qual o valor máximo de IRC foi atingido com a aplicação de 147 kg ha⁻¹ de N (Figura 29).

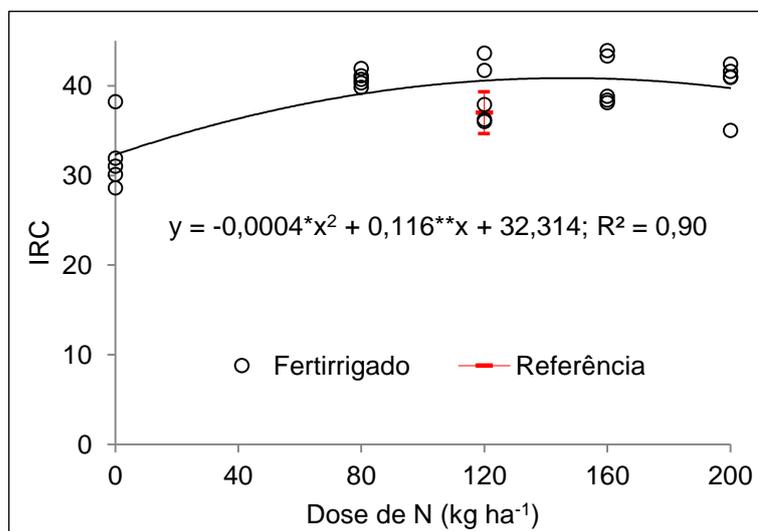


Figura 29 - Índice relativo de clorofila (IRC) na folha bandeira do arroz, na floração plena, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; *, ** significativo a 5% e 1%.

Na avaliação realizada durante a fase vegetativa do arroz (estádio V7-V8), a comparação dos valores de IRC e teor de N na folha índice dos tratamentos com

aplicação de N em cobertura via fertirrigação com o tratamento referência (aplicação de N via solo) mostra superioridade deste último relativamente a todos os demais (Tabela 17). Atribui-se esse resultado ao fato de o tratamento referência ter recebido a aplicação de uma fração elevada da adubação nitrogenada em cobertura (>58% do total) no estágio de quatro a cinco folhas (V4-V5), possibilitando-lhe a absorção de maior quantidade do nutriente que os demais tratamentos até o momento da avaliação.

Na avaliação subsequente (floração plena - estágio R4), para a variável IRC na folha bandeira, o tratamento referência apresentou um valor 16%aquele em que houve omissão da adubação nitrogenada em cobertura. O efeito de todas as demais doses de N aplicadas via fertirrigação foi semelhante ao da referência, com aplicação do nutriente via solo. Por outro lado, nessa mesma época de avaliação, com relação ao teor de N na folha bandeira do arroz, o desempenho do tratamento referência foi superior ao dos demais (aplicação de N via fertirrigação), possivelmente em razão da concentração da aplicação do nutriente no início da fase reprodutiva. Quanto a variável teor de nitrogênio na folha bandeira durante o estágio R4, não foi observado o efeito das doses de N sobre a mesma e sua média foi de 1,45%, esse resultado é atribuído principalmente ao estágio de desenvolvimento da cultura, o qual direciona suas reservas e constituintes para a formação de grãos.

6.4.2 Desempenho agrônômico e produtivo do arroz

Com relação ao desempenho agrônômico das plantas de arroz, determinou-se diferença do tratamento referência (aplicação de N via solo) frente àqueles com fertirrigação para as variáveis estatura de planta e número de panículas. Não se determinou efeito do manejo da adubação nitrogenada em cobertura para o arroz sobre a variável número de perfilhos e sua média foi de 461 m⁻² (Tabela 17).

Especificamente para a estatura de plantas, o desempenho da referência foi superior, apenas, ao tratamento em que não se realizou adubação nitrogenada em cobertura, indicando semelhança no efeito da aplicação de N em cobertura, independentemente da dose, parcelamento e modo de aplicação do nutriente. Quanto ao número de panículas, apenas o tratamento com aplicação da dose mais elevada de N em cobertura (200 kg ha⁻¹ de N) distinguiu-se do tratamento referência, sendo superior a este último.

Especificamente para a estatura de plantas, o desempenho da referência foi superior, apenas, ao do tratamento em que não se realizou adubação nitrogenada em cobertura, indicando semelhança no efeito da aplicação de N em cobertura, independentemente da dose, parcelamento e modo de aplicação do nutriente. Quanto ao número de panículas, apenas o tratamento com aplicação da dose mais elevada de N em cobertura (200 kg ha^{-1} de N) distinguiu-se do tratamento referência, sendo superior a este último.

Quanto ao efeito da dose de nitrogênio aplicada via fertirrigação, verificou-se diferença entre os tratamentos para as variáveis estatura de planta e número de perfilhos. A variação na dose de N aplicada via fertirrigação não influenciou no número de panículas produzidas, que apresentou valor médio de $352 \text{ panículas m}^{-2}$. Este valor é relativamente baixos, quando comparado ao desempenho dessa cultivar em sistema irrigado por inundação do solo, indicando possível necessidade de elevar a densidade de semeadura para o cultivo no sistema irrigado por aspersão. A capacidade de perfilhamento é uma característica variável entre cultivares de arroz, sendo, ainda, bastante influenciada pelas condições de cultivo e manejo. Passos et al. (2015), ao avaliarem 15 cultivares de arroz produzidas sob três doses de N, encontraram uma média de $297 \text{ panículas por m}^2$, estabelecendo relação positiva dessa variável com cultivares de ciclos médio e longo, relativamente às de ciclo precoce.

O efeito da variação na dose de nitrogênio aplicado em cobertura sobre a estatura das plantas de arroz foi descrito por modelo quadrático, com valor máximo correspondente à aplicação de 125 kg ha^{-1} de nitrogênio (Figura 30). Passos et al. (2015), ao avaliarem o efeito de níveis de adubação nitrogenada (0 a 120 kg ha^{-1}) no desempenho de 15 cultivares de arroz irrigado, também observaram efeito crescente do nutriente sobre a estatura das plantas. Por sua vez, Hernandez et al. (2010) relataram a ocorrência de relação direta entre a estatura de plantas de arroz e a disponibilidade de N no meio de cultivo. Segundo esses autores, o efeito do N na estatura das plantas de arroz não depende somente da dose aplicada, mas também da cultivar utilizada e de variáveis climáticas, particularmente a luminosidade, temperatura e umidade.

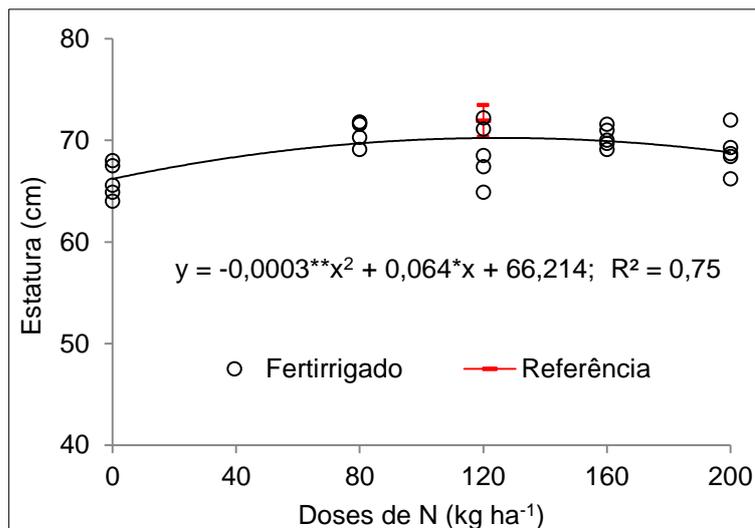


Figura 30 - Estatura de plantas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; *, ** significativo a 5% e 1%.

O aumento na dose de nitrogênio fornecida ao arroz via fertirrigação, favoreceu o perfilhamento do arroz. Os resultados foram ajustados a modelo linear (Figura 31). O número de perfilhos na cultura do arroz está diretamente associado ao perfilhamento durante a fase vegetativa (LOPES; LIMA, 2015). Mateus et al. (2006), ao avaliarem variações no parcelamento da aplicação de 100 kg ha⁻¹ ao arroz, observaram média geral de 980 colmos por m², independentemente do parcelamento da aplicação.

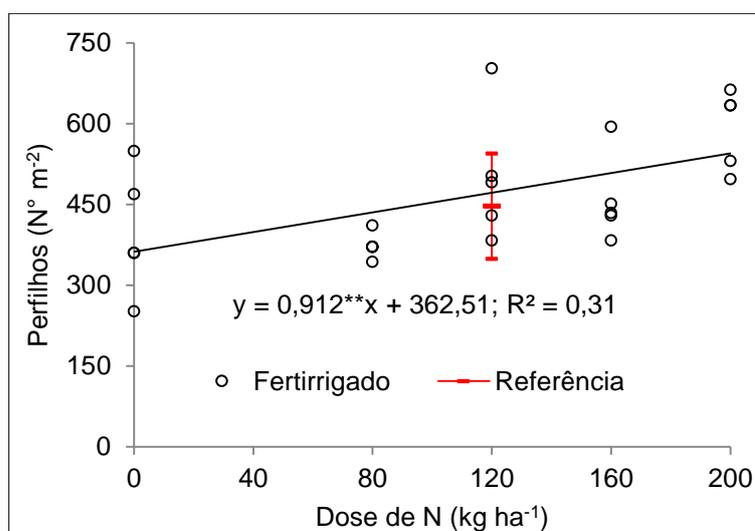


Figura 31 - Número de perfilhos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; **significativo a 1%.

Quanto às variáveis relacionadas ao desempenho produtivo da planta de arroz, determinou-se efeito da dose de nitrogênio aplicada via fertirrigação sobre a produtividade de grãos, esterilidade de espiguetas e massa de 1000 grãos. Por outro lado, não houve efeito dos tratamentos sobre a variável número de espiguetas por panícula, que apresentou valor médio de 75 espiguetas por panícula. Avaliando cultivares de arroz de sequeiro, Fabre et al. (2011) determinaram efeito da variação na dose de N sobre o número de espiguetas por panícula; os valores medidos variaram de 57 a 90.

No presente estudo, o efeito da variação na dose de nitrogênio aplicado em cobertura sobre a produtividade do arroz irrigado por aspersão ajustou-se a modelo quadrático, com valor um valor de máxima eficiência técnica (MET) de 6.603 kg ha⁻¹, correspondente à aplicação de 136 kg ha⁻¹ de N (Figura 32). Rhine et al. (2011), ao avaliarem a técnica de fertirrigação para híbrido de arroz irrigado no Delta do rio Mississippi, obtiveram produtividade máxima de 8.676 kg ha⁻¹ de grãos, utilizando o seguinte parcelamento da aplicação de 150 kg ha⁻¹ de N, 25% da dose aplicada via solo em V4 e o restante, dividido em cinco aplicações com frequência semanal.

Por sua vez a máxima eficiência econômica (MEE) para os preços descritos na metodologia, foi obtida com uma dose de 122 kg ha⁻¹ com a obtenção de uma produtividade de 6577 kg ha⁻¹.

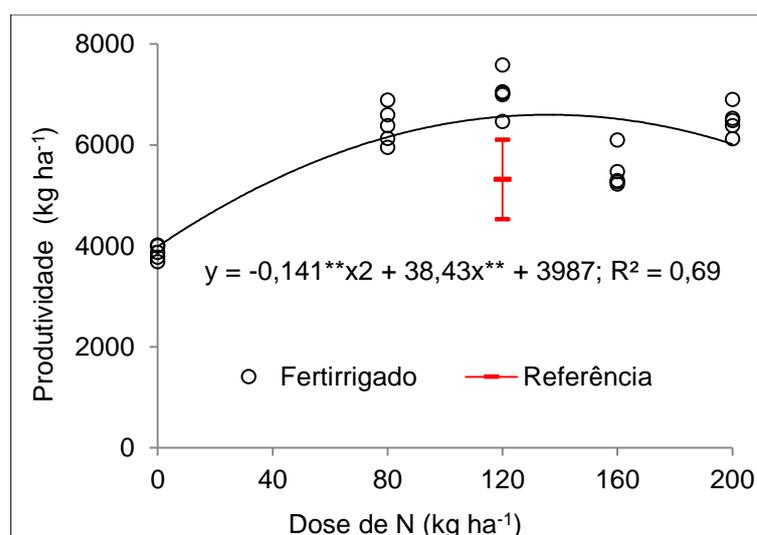


Figura 32 - Produtividade de grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

Também o efeito de doses e parcelamento da adubação nitrogenada via fertirrigação sobre a esterilidade de espiguetas foi descrito por modelo quadrático.

Para esta variável, menor esterilidade de espiguetas de arroz (10,3%) esteve associada ao uso de dose de 116 kg ha⁻¹ de N em cobertura (Figura 33).

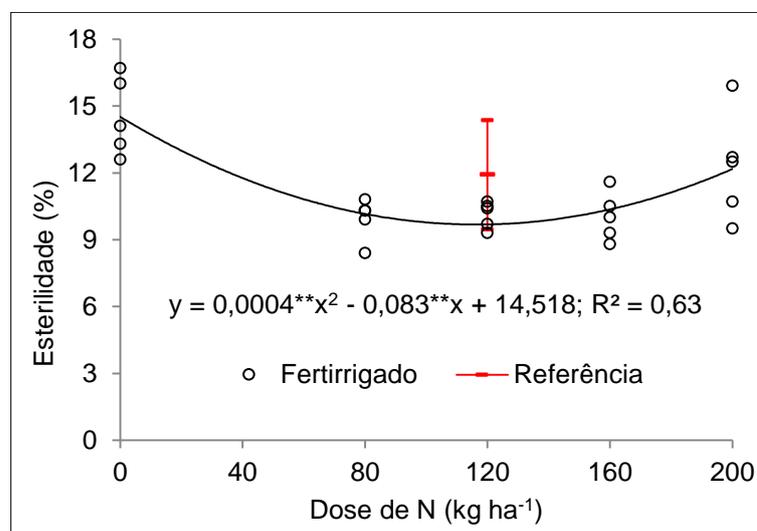


Figura 33 - Esterilidade de espiguetas de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

Na fase reprodutiva, os cereais apresentam maior sensibilidade a estresses biótopos e abiótipos (TAIZ; ZEIGER, 2009). Guimarães et al. (2008), avaliando o efeito da utilização de 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura em cinco cultivares, sendo quatro de sequeiro e uma de arroz irrigado, determinaram variações na esterilidade de espiguetas de 5,5 a 11,5%, para as cultivares de sequeiro, e de 40%, para a cultivar de arroz irrigado.

Quanto ao peso de 1000 grãos, determinou-se efeito direto da variação na dose de N em cobertura aplicada ao arroz, via fertirrigação (Figura 34). Esta variável é um componente que apresenta estreita relação com a produtividade do arroz (ALVARES et al. 2014). Guimarães et al. (2008), utilizando a dose de 100 kg ha⁻¹ de N e cinco cultivares de arroz, encontraram valores de peso de 1000 grãos variando de 16,1 a 30,4 g.

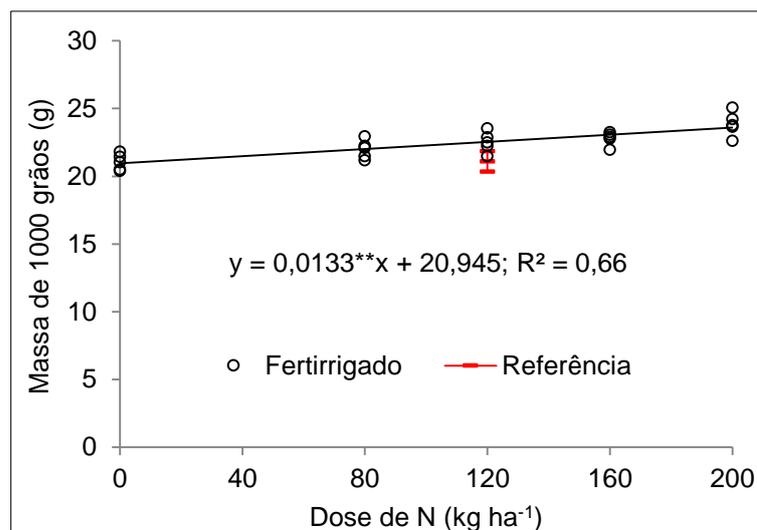


Figura 34 - Peso de 1000 grãos de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

O aumento na dose de N aplicado via fertirrigação para o arroz proporcionou aumento proporcional no rendimento de grãos inteiros (Figura 35). Todavia, independentemente da dose aplicada, os valores obtidos foram inferiores aos 68% requeridos pela indústria orizícola para não penalizar o produtor (CONAB, 2014).

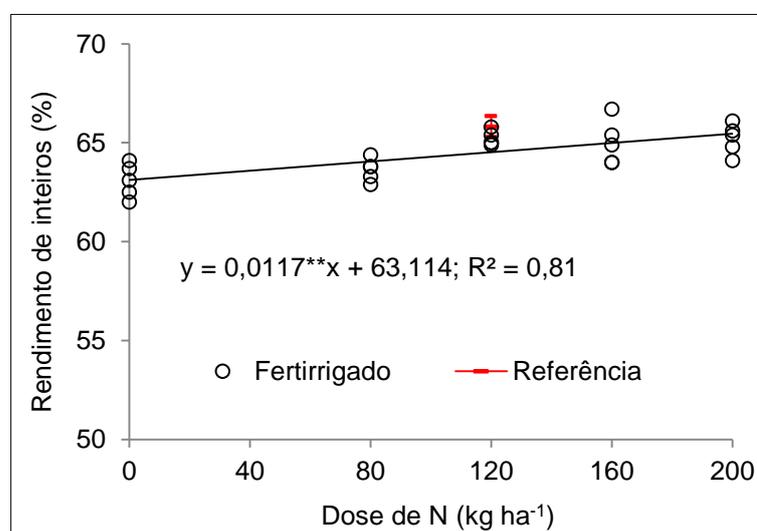


Figura 35 - Rendimento de grãos inteiros de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

Com relação às variáveis associadas ao desempenho produtivo do arroz, apenas para a esterilidade de espiguetas não se determinou diferença entre o tratamento referência, com aplicação de N via solo, e os tratamentos com a aplicação do nutriente, via fertirrigação (Tabela 17).

Nesse sentido, de forma geral, os tratamentos com aplicação de N via fertirrigação proporcionaram maior produtividade de grãos relativamente à aplicação via solo (tratamento referência), exceção feita para os tratamentos com a aplicação de 160 kg ha⁻¹ de N, via fertirrigação, que equiparou-se à referência. Contrariamente, o tratamento com omissão da aplicação de N em cobertura apresentou desempenho inferior ao da referência.

Quanto ao número de espiguetas por panícula, o tratamento referência apresentou desempenho superior aos demais, com exceção do tratamento com aplicação da maior dose de N via fertirrigação (200 kg ha⁻¹ de N), que não diferiu da referência.

Por sua vez, o rendimento de grãos inteiros determinado para o tratamento referência foi inferior ao medido quando da aplicação das duas maiores doses de N via fertirrigação. As demais doses de N não diferiram do tratamento referência, com aplicação de N via solo.

6.4.3 Acumulação de matéria seca e de nitrogênio na planta de arroz

Apenas a acumulação de N na parte aérea das plantas de arroz foi influenciada pela variação na dose de N aplicada via fertirrigação, não havendo efeito desse fator sobre a acumulação de matéria seca e de nitrogênio nos colmos e folhas e nos grãos do arroz.

A quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz aumentou proporcionalmente à dose aplicada via fertirrigação (Figura 36). O coeficiente angular da equação que descreve o comportamento dessa variável indica a necessidade de aplicação de 8,7 kg ha⁻¹ de N ao arroz para promover a incorporação de 1 kg de N na parte aérea da planta. Ntanos e Koutroubas (2002), avaliando cinco cultivares de arroz adubadas com 140 kg ha⁻¹ N, parcelados em três aplicações, encontraram acumulações de N na planta variando de 23,6 e 44,9 kg ha⁻¹.

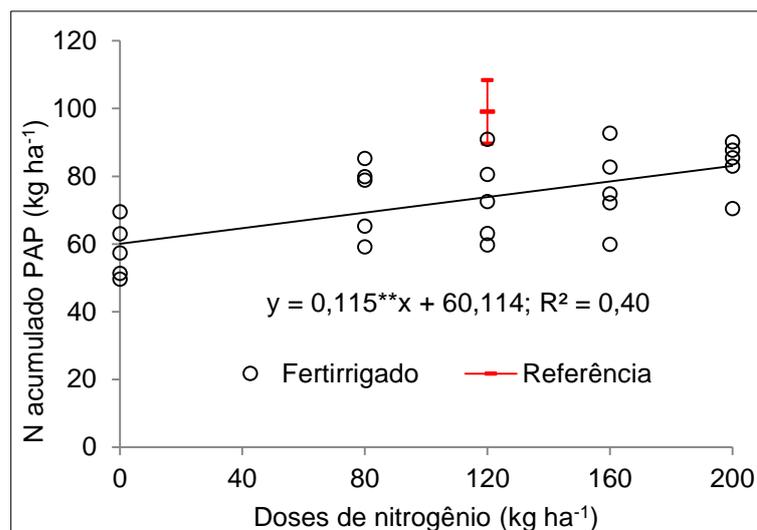


Figura 36 - Nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas (PAP) de arroz, em função da dose de nitrogênio aplicado em cobertura, via fertirrigação. Barras verticais representam o intervalo de confiança, ao nível de 5%, do tratamento referência; ** significativo a 1%.

Belder et al. (2004), trabalhando com regimes intermitentes de irrigação e duas doses de adubação nitrogenada em cobertura, relata valores de nitrogênio absorvido pela parte aérea da planta entre 46 e 91 kg ha⁻¹.

6.4.4 Eficiência do uso do nitrogênio pela planta de arroz

Os resultados da recuperação aparente do nitrogênio (RAN), eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) e eficiência fisiológica de uso do nitrogênio (EFUN) pelas plantas de arroz são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 - Recuperação aparente de nitrogênio (RAN), eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) e eficiência fisiológica do uso do nitrogênio (EFUN).

Tratamentos	RAN (%)	EAUN (kg kg ⁻¹)	EFUN (kg kg ⁻¹)
Referência	16,98	12,06	88,51
T2	19,39	21,01	52,69
T3	14,82	26,29	94,87
T4	11,42	13,35	90,02
T5	12,61	21,78	75,30

Referência – dose de 120 kg·ha⁻¹ de N, sendo 50 kg aplicados no estágio V4 e 70 kg aplicados no estágio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T2 – dose de adubação nitrogenada em cobertura de 80 kg ha⁻¹, aplicados via fertirrigação com 4 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R1; T3, T4 e T5 – doses de adubação nitrogenada em cobertura de 120, 160 e 200 kg ha⁻¹, respectivamente, aplicados via fertirrigação com 6 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R4.

Neste estudo, a RAN do tratamento referência apresentou valor intermediário em relação à amplitude determinada para os tratamentos com aplicação de N, via

solo. Dentre estes, por sua vez, a recuperação aparente do nitrogênio decresceu, de forma geral, com o aumento da dose de N aplicada, indicando não haver vantagem da aplicação de doses de N além da recomendada (120 kg ha^{-1} de N) sobre a acumulação do nutriente pela planta de arroz. Mesmo para a dose de 80 kg ha^{-1} de N, que proporcionou maior RAN, o valor obtido foi inferior àqueles determinados por Dobermann (2007); Fageria et al. (2007); Borim (2014); Ladha et al. (2016), que variaram de 20 a 45%.

Assim como no estudo anterior, a maior eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) foi obtida no tratamento com aplicação de 120 kg ha^{-1} de N, via fertirrigação, cujo efeito superou em mais de duas vezes aquele do tratamento referência, em que se aplicou a mesma dose de N, via solo. O efeito dos demais tratamentos envolvendo fertirrigação foi intermediário aos dois referidos anteriormente, não se observando padrão de variação associado à dose de N aplicada ao arroz.

Quanto à variável eficiência fisiológica do uso do nitrogênio (EFUN), para os tratamentos em que se adotou a técnica de fertirrigação, esta aumentou, de forma geral, com o incremento na dose de N aplicada ao arroz, exceção feita para a dose de 200 kg ha^{-1} de N, cujo efeito foi menor que o determinado para as doses de 120 e 160 kg ha^{-1} de N. Para esta variável o efeito da dose de N aplicado foi mais evidente que aquele proporcionado pela forma de aplicação do N, via solo ou fertirrigação.

6.4.5 Marcha de absorção de nitrogênio pelas plantas de arroz

Os resultados da estimativa dos parâmetros das equações utilizadas para descrever o acúmulo de matéria seca da parte aérea e de nitrogênio pela planta de arroz ao longo do ciclo são apresentados na tabela 19. De forma geral, os valores dos parâmetros medidos foram próximos para todos os tratamentos com aplicação de nitrogênio, via solo (referência) ou fertirrigação (T2 a T5); apenas o tratamento testemunha sem a aplicação de N em cobertura (T1) proporcionou valores inferiores aos demais, indicando a importância do suprimento adequado de N para o crescimento e acumulação de matéria seca e de nitrogênio pelas plantas de arroz. Especificamente para os parâmetros que estimaram a acumulação de nitrogênio na parte aérea do arroz, os valores de θ , que se refere ao N acumulado na maturação dos grãos – estágio R9, e de β , que se refere à taxa de absorção de N, foram

diretamente proporcionais às doses de N avaliadas. Amabile et al. (2003), avaliando curvas de crescimento e a marcha de absorção de meloeiro, relataram tendência de proporcionalidade semelhante entre os valores de θ e as doses de N utilizadas.

Tabela 19 - Parâmetros das equações 7 e 8 e os respectivos coeficientes de determinação para os seis tratamentos avaliados.

Parâmetro	Referência	T1	T2	T3	T4	T5
Massa seca da parte aérea da planta						
θ	11850	9275	11247	12120	11103	11756
α	12,247	11,220	11,125	11,129	10,892	11,107
β	0,161	0,141	0,138	0,137	0,151	0,151
λ	0,452	0,531	0,477	0,465	0,548	0,561
R ²	0,92	0,98	0,98	0,97	0,95	0,95
Nitrogênio acumulado na parte aérea da planta						
θ	93,986	64,846	98,543	85,689	91,453	100,527
α	10,735	10,851	10,673	9,211	10,892	12,538
β	0,169	0,148	0,137	0,139	0,162	0,181
λ	0,429	0,348	0,353	0,463	0,397	0,418
R ²	0,52	0,78	0,68	0,64	0,77	0,77

Referência – dose de 120 kg·ha⁻¹ de N, sendo 50 kg aplicados no estágio V4 e 70 kg aplicados no estágio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T1 – Testemunha com omissão de adubação nitrogenada em cobertura; T2 – dose de adubação nitrogenada em cobertura de 80 kg ha⁻¹, aplicados via fertirrigação com 4 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R1; T3, T4 e T5 – respectivas doses de adubação nitrogenada em cobertura de 120, 160 e 200 kg·ha⁻¹, aplicados via fertirrigação com 6 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R4.

Nas figuras 37 a 39 são apresentados, respectivamente, para os tratamentos testemunha (T1), referência (120 kg ha⁻¹ de N, via solo) e com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação (T3), os dados observados e calculados de acumulação de matéria seca (MSPA) e de nitrogênio na parte aérea das plantas de arroz (NAPA) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

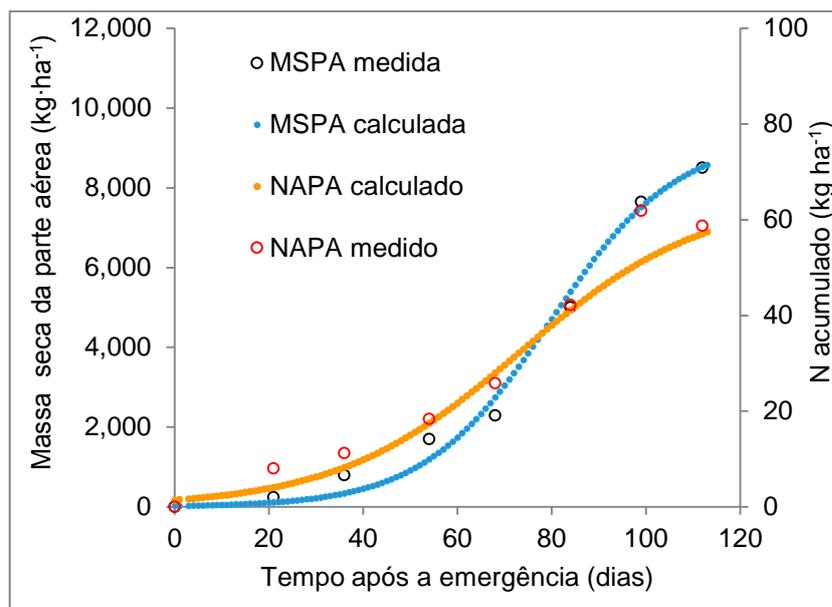


Figura 37 – Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MPAP) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPAP) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão no tratamento T1 (omissão de adubação nitrogenada em cobertura).

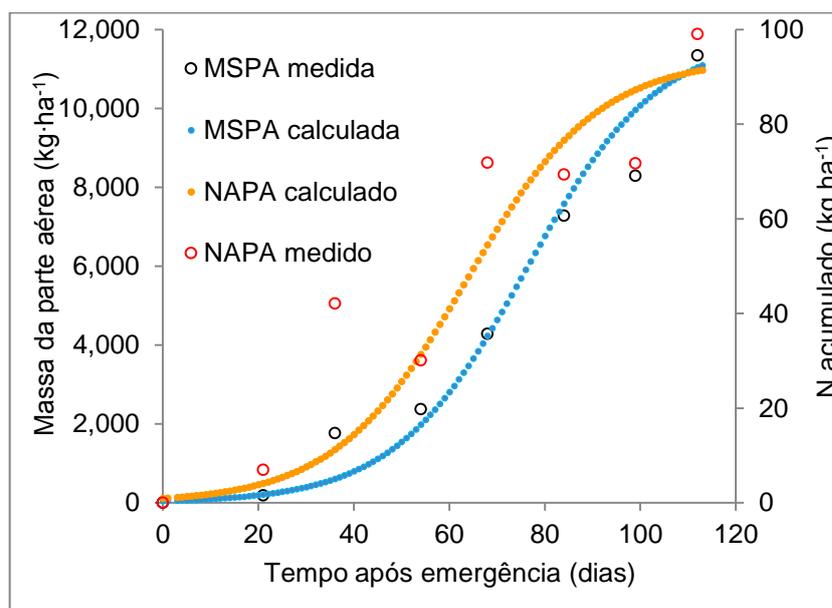


Figura 38 - Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão no tratamento referência - 120 kg ha⁻¹ (parcelados 70 kgha⁻¹ de N em V4 e 50 kg ha⁻¹ de N em R0).

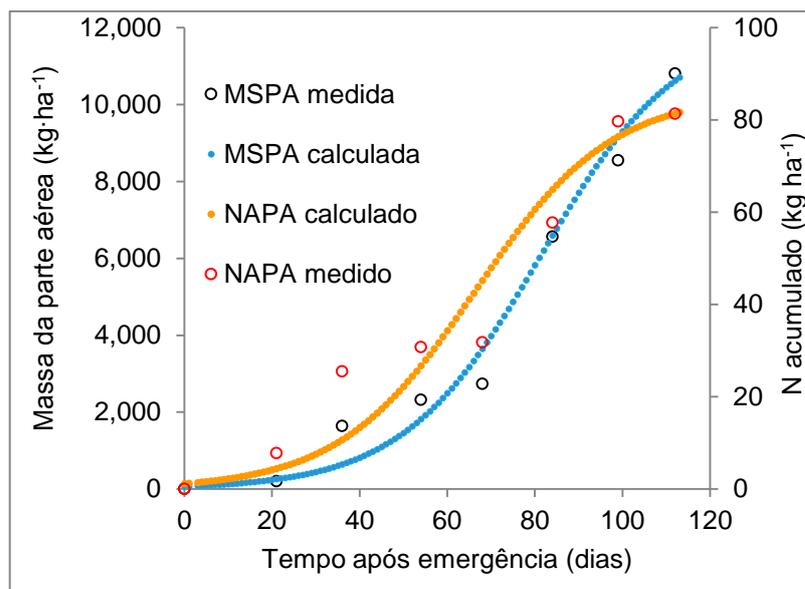


Figura 39 - Valores medidos e estimados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPAP) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T3 (120 kg ha⁻¹, parcelados em seis aplicações, entre os estádios V4 e R4).

Comparando as figuras 37 a 39, verifica-se menor diferença entre os dados medidos e estimados (equações 7 e 8) no tratamento testemunha (Figura 37), relativamente aos demais (Figuras 38 e 39), provavelmente em razão do menor crescimento das plantas, que está associado à menor disponibilidade de N no meio de cultivo, visto que nesse tratamento não foi realizada cobertura com N. Por outro lado, no tratamento referência (Figura 38), onde a adubação nitrogenada em cobertura foi parcelada em apenas duas aplicações, os dados medidos de N acumulado na planta foram bem superiores aos estimados, particularmente na segunda época de avaliação (36 DAE), que sucedeu em 11 dias a primeira cobertura com N (70 kg ha⁻¹ de N). Já em T3 (Figura 39), em que se aplicou a mesma dose de N em cobertura do tratamento referência (120 kg ha⁻¹ de N), porém parcelada em seis aplicações via água irrigação, a diferença entre os dados medidos e estimados foi bem mais discreta, demonstrando que o maior fracionamento da adubação, possibilitado pela fertirrigação, minimiza a ocorrência de picos de absorção do N, o que é favorável sob os aspectos nutricional, pela melhor distribuição do fornecimento do nutriente ao longo do período de demanda da planta de arroz, e fitossanitário, evitando períodos de concentrações muito elevadas de N na planta, tornando-a mais atrativa e suscetível à incidência de doenças e pragas.

A associação dos dados das figuras 38 e 39 com os resultados de produtividade de grãos dos tratamentos referência e T3 (Figura 32) confirma o benefício do maior parcelamento da adubação nitrogenada, viabilizado pela aplicação do N via água de irrigação, sobre a acumulação de matéria seca e de nitrogênio pela planta de arroz, com reflexo positivo sobre a produtividade de grãos.

Em síntese, tais resultados demonstram que a aplicação da dose recomendada de N (120 kg ha^{-1}) ao arroz irrigado por aspersão, parcelada em seis aplicações via água de irrigação, propicia maior acumulação de matéria seca e de N nas plantas de arroz, relativamente ao manejo convencional do N para a cultura, que prevê o parcelamento da cobertura com N em duas aplicações, no início do perfilhamento e na diferenciação da panícula. Esse efeito resulta em maior eficiência de conversão da cultura, expressa por meio de maior produtividade de grãos. Também é indicativo de que o maior parcelamento da adubação nitrogenada em arroz irrigado por aspersão, com a utilização da técnica de fertirrigação, reduz as perdas de N no sistema solo-planta.

6.4.6 Concentração de nitrato e amônio na solução do solo

O efeito do manejo da adubação nitrogenada em cobertura sobre a concentração de amônio (NH_4^+) na solução do solo ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz é apresentado na tabela 20. Em todas as seis datas de coletas realizadas, não se determinou diferença entre os tratamentos quanto ao teor de amônio na solução do solo. A análise desse resultado demonstra, ainda, redução na concentração de amônio na solução do solo ao longo do tempo, especialmente até o 65º DAE, o que reflete a variação na demanda do nutriente ao longo do ciclo de cultivo. Após essa coleta, as concentrações de amônio medidas aumentaram ligeiramente, possivelmente devido à redução no volume de solução, pois mesmo com sete extratores instalados nas parcelas experimentais de cada tratamento, não se conseguiu coletar volume de solução suficiente para a determinação das concentrações de formas minerais de N nos tratamentos T1, T2 e T6, a partir do 65 DAE.

Tabela 20 - Concentração de amônio (NH_4^+ - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), na solução do solo, ≈ 12 h após as fertirrigações.

Tratamentos	Época de coleta (DAE - dias após a emergência)					
	25	38	49	65	77	92
Referência	2,46a	0,93a	0,57a	0,73a	-	0,49a
T1	3,10a	2,00a	0,34a	0,16a	-	0,62a
T2	3,44a	1,58a	0,84a	0,39a	0,72a	0,32a
T3	1,38a	4,20a	2,30a	0,32a	1,69a	1,07a
T4	2,08a	2,60a	0,86a	0,43a	1,69a	1,49a
T5	2,06a	2,39a	1,39a	0,63a	-	1,87a
CV (%)	31,0	49,0	67,0	47,0	41,0	63,0

Referência – dose de $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, sendo 50 kg aplicados no estádio V4 e 70 kg aplicados no estádio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T1 – Testemunha com omissão de adubação nitrogenada em cobertura; T2 – dose de adubação nitrogenada em cobertura de 80 kg ha^{-1} , aplicados via fertirrigação com 4 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R1; T3, T4 e T5 – respectivas doses de adubação nitrogenada em cobertura de 120, 160 e $200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, aplicados via fertirrigação com 6 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R4; nas colunas médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Na tabela 21, são apresentados os dados de concentração de nitrato na solução do solo, em função do manejo da adubação nitrogenada para a cultura de arroz irrigado por aspersão. Assim como o íon amônio, não houve diferença entre os tratamentos sobre o teor de nitrato na solução do solo em nenhuma das épocas de avaliação. Observou-se, ainda, tendência de redução nos teores de nitrato em solução até a terceira época de coleta (49 DAE); na sequência, os apresentaram discreto aumento. De forma geral, esse efeito reflete a variação na demanda de N pelas plantas de arroz, que é máxima na fase de floração.

Tabela 21 - Concentração de nitrato (NO_3^- - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), na solução do solo, ≈ 12 h após as fertirrigações.

Tratamentos	Época de coleta (DAE - dias após a emergência)					
	25	38	49	65	77	92
Referência	2,00a	1,03a	0,27a	0,24a	-	0,56a
T1	2,73a	2,33a	-	0,18a	-	0,43a
T2	1,86a	0,83a	0,12a	0,30a	0,45	1,70a
T3	2,83a	1,10a	0,26a	0,22a	-	1,47a
T4	1,08a	0,60a	0,10a	0,27a	-	1,43a
T5	3,22a	1,41a	0,06a	0,85a	-	1,33a
CV (%)	34,0	50,0	60,0	73,0	-	46,0

Referência – dose de $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, sendo 50 kg aplicados no estádio V4 e 70 kg aplicados no estádio R0, ambas as aplicações com ureia granular via solo; T1 – Testemunha com omissão de adubação nitrogenada em cobertura; T2 – dose de adubação nitrogenada em cobertura de 80 kg ha^{-1} , aplicados via fertirrigação com 4 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R1; T3, T4 e T5 – respectivas doses de adubação nitrogenada em cobertura de 120, 160 e $200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, aplicados via fertirrigação com 6 aplicações parceladas entre os estádios V5 e R4; nas colunas médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

7 CONCLUSÕES

1. A adubação nitrogenada via fertirrigação, por permitir maior parcelamento do nitrogênio, aumenta o rendimento de grãos do arroz irrigado por aspersão, comparativamente à adubação convencional via solo, quando o manejo de irrigação é baseado na tensão de água no solo de 10 kPa.

2. No arroz irrigado por aspersão, o uso da técnica de fertirrigação para a aplicação de nitrogênio, parcelado em seis aplicações, proporciona maior eficiência agrônômica do nutriente em relação ao manejo convencional, onde a cobertura nitrogenada parcelada duas aplicações via solo.

3. No cultivo de arroz irrigado por aspersão, a dose de máxima eficiência econômica do nitrogênio corresponde a 100 kg ha^{-1} , quando aplicado em cobertura, via fertirrigação, parcelado em seis aplicações.

4. As taxas máximas de crescimento e absorção de nitrogênio ocorreram aproximadamente aos 50 dias após a emergência, correspondendo, ao estágio de 10 folhas.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo das três safras foi adquirida experiência no cultivo de arroz irrigado por aspersão, visto tratar-se de inovação e existirem poucos resultados científicos sobre o tema, principalmente no que tange ao manejo da cultura. Assuntos como manejos de plantas daninhas e das adubações de base e cobertura, incluindo a fertirrigação, tiveram melhorias consideráveis ao longo da execução do presente estudo.

O manejo da água, tendo 10 kPa como tensão de referência para o retorno da irrigação, adotado nas safras 2013/2014 e 2014/2015, associado ao parcelamento da adubação nitrogenada via irrigação por aspersão (fertirrigação), propiciaram produtividades próximas àquelas obtidas no sistema irrigado por inundação. Por outro lado, considerando-se que o consumo médio de água no sistema tradicional de cultivo de arroz irrigado por inundação no estado do Rio Grande do Sul é de $9.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, a adoção de irrigação por aspersão nas safras mencionadas propiciou economia de água de aproximadamente 50% (o consumo médio de água nessas duas safras foi de $4.440 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Essa economia decorre tanto da conversão do método de irrigação de inundação para aspersão, como do melhor aproveitamento da água das chuvas ocorridas no período.

Os resultados referentes às curvas de crescimento e à marcha de absorção de nitrogênio pela cultura do arroz mostraram que as taxas máximas de crescimento e de absorção de nitrogênio ocorreram aproximadamente aos 50 dias após a emergência, correspondendo, ao estágio de 10 folhas (V10), para a cultivar de arroz irrigado de ciclo precoce BRS Pampa. Todavia, a planta de arroz demanda o nutriente desde os estádios iniciais de desenvolvimento, visto ser essencial para a fotossíntese, estendendo-se até próximo do final do ciclo. Os dados obtidos mostraram claramente

que o maior parcelamento do nitrogênio ao longo do tempo é benéfico à produtividade de grãos do arroz, proporcionando maiores acumulação do nutriente na planta e eficiência agrônômica do fertilizante aplicado.

A análise dos dados dos três experimentos realizados mostra que a dose de máxima eficiência econômica (DMEE) proporcionada pela aplicação de N via fertirrigação foi menor que a do tratamento referência (120 kg ha⁻¹ de N) nas duas primeiras safras agrícolas e aproximadamente igual a desse tratamento na safra 2014/2015 (122 kg ha⁻¹ de N). Todavia, em todos os experimentos, o uso da DMEE via fertirrigação proporcionou incremento de superior ao do tratamento referência, o que se constata pela menor diferença entre as produtividades dos tratamentos com aplicação de N em cobertura e a testemunha (com omissão de adubação nitrogenada em cobertura) (Tabela 22).

Nas três safras, a aplicação de N via fertirrigação proporcionou maior eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAUN) em relação ao tratamento referência, cuja cobertura foi aplicada via solo. Ressalta-se, ainda, que, na safra 2014/2015, onde a DMEE foi aproximadamente igual à dose de N utilizada no tratamento referência, a EAUN do tratamento com a aplicação da mesma dose de N via fertirrigação foi 77% superior a do tratamento referência.

A maior diferença percentual entre a EAUN dos tratamentos fertirrigados e referência ocorreu na safra 2013/2014 (173%). Esse efeito deve estar associado às melhores condições de manejo da cultura, incluindo a semeadura na época correta e a ocorrência de condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento da cultura, visto que até o final da fase vegetativa ocorreram poucos eventos de chuva, os quais ficaram concentrados em sua maioria a partir da fase reprodutiva que é a fase mais sensível da cultura ao déficit hídrico (Figura 5B).

Considerando-se os valores médios da EAUN dos tratamentos fertirrigado (EAUN média de 22,1%) e referência (EAUN média de 9,8%), cada quilograma de nitrogênio aplicado ao arroz utilizando-se a técnica de fertirrigação proporcionou incremento de produtividade cerca de duas vezes maior que a aplicação via solo. É importante salientar que esses resultados possivelmente devem-se ao fato de as fertirrigações terem sido parceladas em maior número de aplicações (aproximadamente seis) entre o estágio de quatro folhas (V4) e o início da fase reprodutiva, enquanto que no tratamento referência a cobertura com N foi dividida em apenas duas aplicações, nos estádios de quatro folhas (V4) e de iniciação da panícula

(R0). O maior parcelamento deve ter favorecido o aproveitamento do nutriente aplicado, com reflexos positivos sobre o metabolismo da planta, já que em duas (2012/2013 e 2014/2015) das três safras avaliadas não houve aumento nos teores de N absorvidos pelas plantas (Tabelas 9 e 17), ao se confrontarem os tratamentos com aplicação de mesma dose de nitrogênio (120 kg ha^{-1}), via solo e fertirrigação.

Tabela 22 - Resumo com os principais resultados dos três experimentos:

Data de semeadura	Safras	Fertirrigado					Referência		
		DMET	DMEE	P _{mee}	EAUN ¹	P ₀ /P _{mee} ³	P _{ref}	EAUN ²	P ₀ /P _{fert} ⁴
05/12/12	2012/2013	99	87	4936	17,5	69%	4280	7,3	80%
02/11/13	2013/2014	98	89	8882	27,6	72%	7207	10,1	89%
24/10/14	2014/2015	136	122	6577	21,2	60%	5317	12,0	75%
	Médias	110	99	6798	22,1	68%	5600	9,8	81%

¹ - Cálculo realizado com a utilização dos dados de dose de máxima eficiência econômica (DMEE) e produtividade para a dose de máxima eficiência econômica (P_{mee}), relativos à máxima eficiência econômica; ² - Cálculo realizado com utilização dos dados do tratamento referência; ³ - Relação de produtividade entre o tratamento testemunha e a produtividade obtida com a utilização da DMEE; ⁴ - Relação de produtividade entre o tratamento testemunha e o tratamento referência.

REFERÊNCIAS

- ADDISCOTT, T. M. **Nitrate agriculture and the environment**. CABI 1º ed. 2005, 304 p. Disponível em <https://books.google.com.br/books?id=N46DxR1xevYC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false> Acessado em 15/06/2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14244: Equipamentos de irrigação mecanizada – Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos – Determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 1998. 11 p.
- ALENCAR, C. A. B.; CUNHA, F. F.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; ROCHA, W. S. D.; ARAUJO, R. A. S. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo, **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.98-108, 2009.
- ALVARES, R. C. F.; CRUSCIOL, C.A. C.; NASCENTE, A. S. Produtividade de arroz de terras altas em função de reguladores de crescimento. **Revista Ceres**, v. 61, n.1, p. 42-49, 2014.
- AMABILE, R. F.; GUIMARÃES, D. P.; FARIAS NETO, A. L.; Análise de crescimento de girassol em Latossolo com diferentes níveis de saturação por bases no Cerrado, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 219-224, 2003.
- ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; NASCENTE, A. S.; LACERDA, M. C. Espaçamento e adubação nitrogenada afetando o desenvolvimento do arroz de terras altas sob plantio direto. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 62, n.5, p. 475-482, set-out, 2015.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, v. 31, n. 04, p. 715-722, 2001.
- ARTIGIANI, A. C. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; ARF, O.; ALVAREZ, C. R. F. Adubação silicatada no sulco e nitrogenada em cobertura no arroz de sequeiro e irrigado por aspersão. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 240-251, 2014.
- ÁVILA, F. W.; BALIZA, D. P.; FAQUIN, V.; ÁRAUJO, L.; RAMOS, S. J. Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 184-190, 2010.
- AZEVEDO, H. J.; SALASSIER, B. RAMOS, M. M.; SEDYAMA, C. G.; CECON, P. R. Influência de elementos do clima no desperdício de energia em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3 n.3, p. 336-341, 1999.

- BARRY, Roger G. & CHORLEY Richard J. Composição, massa e estrutura da atmosfera, In___ **Atmosfera, tempo e clima**, Bookman; Porto Alegre; 2013 p. 13-40, Disponível em <https://play.google.com/books/reader?printsec=frontcover&output=reader&id=t8LXP791TMI&pg=GBS.PR2>> Acessado em 05/09/2015.
- BELDER, P.; SPIERTS, J. H. J.; BOUMAN, B. A. M.; LU, G.; TUONG, T. P. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation. **Field Crops Research**, n. 93, p. 169-185, 2005.
- BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. **Bioresource Technology**. v. 100; p. 5444-5453, 2009.
- BERNARDO, Salassier; SOARES, Antônio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Manual de irrigação**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 625 p.
- BEVILACQUA, C. B.; BORGES, C. T.; VENSKE, E.; ALMEIDA, A. S.; ZIMMER, P. D. Acúmulo de fitomassa e teor de clorofila em plântulas de cultivares de arroz sob estresse por frio, **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 4, out./dez., p. 229-233, 2015.
- BORGES, A. L. & COELHO, E. F.; Aspectos básicos da fertirrigação. In___ **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. 2° ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e fruticultura Tropical, 2009.p. 9-19.
- BORGES, A. L.; COELHO, E. F.; COSTA, É. L.; SILVA, J. T. A.; **Circular técnica nº 84**; Embrapa Mandioca e Fruticultura; Cruz das Almas – BA; Dezembro, 2006.
- BORGES, A. L.; SILVA, D. A.; Fertilizantes para fertirrigação In___ **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**, 1° ed. Lavras, UFV, 2011. p. 253-264.
- BORIM, José Bernardo Moraes. **Alterações da solução do solo e resposta do arroz irrigado ao manejo da irrigação e da adubação nitrogenada**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2014.
- BORNER, T.; MENDEL, R. R.; SCHIEMANN, J.; Nitrate reductase is not accumulated in chloroplast-ribosome-deficient mutants of higher plants. **Planta**. V. 169, n. 2, p. 202-207, 1986.
- BORTOLOTTTO, R. A.; BRUNO, I.P.; REICHARDT, K.; TIMM, L. C.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; Nitrogen fertilizer (¹⁵N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. **Rev. Ceres Viçosa**, v. 59, n.4, p. 466-475, 2012.
- BRUNO, I. P.; REICHARDT, K; BORTOLOTTTO, R. P.; PINTO, V. M.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO-NETO, D.; UNKOVICH, M. J. Nitrogen balance and fertigation use efficiency in a field coffee crop. **Journal of Plant Nutrition**, v. 38, p. 00-00, 2015.
- BURESH, R.; J.; REDDY, K. R.; KESSEL, C. V. Nitrogen transformations in submerged soils. In___ **Nitrogen in Agricultural System**; 1° ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 254 – 308.

- BURLE, M. L.; MIELNICZUK, J., FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**. v.190, p. 309-316, 1997.
- CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; VIDOR, C. Nitrogênio orgânico do solo. In___**Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Gênese, 1999. p. 117-133.
- CANCELLIER, E. L., BARROS, H. B., KRISCHEL, E., GONZAGA, L. A. M., BRANDÃO, D. R., FIDELES, R. R. Eficiência agrônômica no uso de nitrogênio mineral por cultivares de arroz de terras altas, **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n. 4, p. 650-656, 2011.
- CANTARELLA, Heitor. Nitrogênio. In:___**Fertilidade do solo**. 1° ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.422-423.
- CASTELLANOS, M. T.; TARQUIS, A. M.;RIBASA, F.; CABELLOA, M. J.; ARCED, A.; CARTAGENA, M. C.; Nitrogen fertigation: An integrated agronomic and environmental study, **Agricultural Water Management** . v. 120, n. 2, p. 46-55, 2013.
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942.124 p.
- COELHO, E. F.; COSTA, F. S.; SILVA, A. C. P.; CARVALHO, G. C. Concentração de nitrato no perfil do solo fertirrigado com diferentes concentrações de fontes nitrogenadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.263–269, 2014.
- COELHO, E. F.; SILVA, J. G. S.; SOUZA, L. F. S. Irrigação e fertirrigação. In___**MAMÃO**. 1° ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2000. p. 37-42.
- CONAB: Acompanhamento da safra Brasileira v.2, n. 9. Junho/2015 Disponível em<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_06_11_09_00_38_boletim_graos_junho_2015.pdf> Acessado em 22/06/2015.
- COUNCE, P.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development; **Crop Science**, v.40, n.2, p. 436-443, 2000.
- DANCER, W. S.; PETERSON, L. A.; CHESTERS, G.; Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous N treatments. **Soil Science Society**.n.1, v. 37, p. 67-69, 1973.
- DENG, F; WANG, L; REN, W. J; LI, S. X. Optimized nitrogen managements and polyaspartic acid urea improved dry matter production and yield of *indica* hybrid rice. **Soil & Tillage Research**. n. 145, p. 1-9, 2014.
- DINIZ, Lídia Tarchetti. **Efeito da adubação nitrogenada via fertirrigação, no nitrogênio da biomassa microbiana do solo e na qualidade de grão de cevada**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias), Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

DOBERMANN, A. Nitrogen use efficiency – measurement and management. In: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION WORKSHOP ON FERTILIZER BEST MANAGEMENT PRACTICES, 2007.

DUNN, D.; STEVENS, G. **University of Missouri soil test recommendations for rice production**. In: Dickens, C.; Beighley, D. (eds.) Missouri rice research update 2006.

DUTRA, A. D.; RADMANN, V. ; MARQUES NETO, G. C. ; VAHL, L. C. Variação temporal dos teores de nitrato e amônio em solo alagado sob diferentes fontes de adubo nitrogenado. In: **X Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo Fatos e Mitos em Ciência do Solo**, 2014, Pelotas. 2014

EMBRAPA – EMBRAPA CLIMA TEMPERADO: Laboratório de Agrometeorologia. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/agromet/>. Acesso em: 05 Jan. 2016.

FABRE, D. V. O.; CORDEIRO, A. C. C.; FERREIRA, G. B.; VILARINHO, A. A.; MEDEIROS, R. D.; Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em arroz de várzea. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 41, n. 1, p. 29-38, 2011.

FABRICIO, A. C.; KURIHARA, C. H.; SANTOS, A. B.. Resposta do arroz irrigado a doses de nitrogênio e potássio. VI REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO – FERTIBIO, 2006, Bonito. **Anais...FERTIBIO**, Bonito – MS, 2006. 1 CD-ROM.

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, jul. 2007.

FAGERIA, Nand Kumar. **Nitrogen management in crop production**. Boca Raton: CRC Press, 2014. 408 p.

FAO/AQUAST: Water withdrawal by sector, 2014
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/tables/WorldData-Withdrawal_eng.pdf>Acessado em 28/09/2015.

FAO/FAOSTAT: Irrigation areas sheet, 2015
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/irrs/readPdf.html?f=BRA-IRR_eng.pdf>Acessado em 28/09/2015.

FAOSTAT: Food and Agricultural commodities production, 2012
Disponível em <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>Acessado em 29/09/2015.

FAOSTAT: Production quantities by country, 2013. Disponível em <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> , Acessado em 27/09/2015.

FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E.; PRADO, G. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.29, n.1, p.19-27, jan./mar. 2009.

FAROOQ, M.; SIDDIQUE, K. H. M.; REHMAN, H.; AZIZ, T.; LEE, D. J.; WAHID, A.; Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities. **Soil & Tillage Research**.v.111, n. 1, p. 87-98, 2011.

FIRESTONE, M. K.; Biological de nitrification. In:___**Nitrogen in agricultural soil**. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p. 282-326.

GOVINDAN, R.; GRACE, M. T.; GURUSAMY, A. Agronomic Practices For Raised Bed Rice Under Drip Fertigation System: Drip fertigation technology in rice. 1° ed. Saarbrücken: LAMBERT: Academic Publishing, 2012. 116 p.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; NEVES, C. F. Eficiência produtiva de cultivares de arroz com divergência fenotípica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p.465–470, 2008.

HAVLIN, John L. Nitrogen. In:___**Soil fertility and fertilizers**. 8° ed. New Jersey: Pearson, 2014. p. 117-184.

HERNANDES, A., BUZETTI, S., ANDREOTTI, M.; ARF, O.; SÁ, M. E.; Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em cultivares de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 34, n. 2, p. 307-312, 2010.

HUANG, X.; KURATA, N.; WEI, X.; WANG, ZI-X.; WANG, A.; ZHAO, Q.; ZHAO, Y.; LIU, K. A map of rice genome variation reveals the origin of cultivated rice. **Nature**. v. 490, p. 497–501, 2012.

JANDREY, Douglas Batista. **Doses de nitrogênio em cobertura do arroz irrigado em sucessão a espécies de inverno**. 2008 96 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

KOOP, Luciana Marini. **Índices de desenvolvimento para estações de bombeamento em lavouras de arroz irrigado**. 2015 107 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

LADHA, J. K.; A. TIROL-PADRE, A.; REDDY, A. C.; CASSMAN, K. G.; VERMA, S.; POWLSON, D. S.; KESSEL, C. V.; RICHTER, D. B.; CHAKRABORTY, D.; PATHAK, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production system, **Nature**, n. 4 Scientific Reports, DOI: 10.1038/srep19355 disponível em: <http://www.nature.com/srep/> Acessado em 03/04/2016.

LARCHER; Walter. The utilization of mineral elements. In___**Physiological Plant Ecology**. 3° ed. Stuttgart: Springer. 1995, p.167-211.

LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Nitrogen use efficiency 1.Uptake of nitrogen from the soil.**Annals of Applied Biology**. n. 149, p. 243-247, 2006.

LI; Yong, YANG, Lin Zhang; WANG, Chao. Evaluation of fertilizing schemes for direct-seeding rice fields in Taihu Lake basin, China. **TUBITAK**, n. 34, v. 2, p. 83-90, 2010.

LOPES, N. F. e LIMA, M. G. S., Nitrogênio e produtividade das culturas. In: _____ **Fisiologia da produção**. Viçosa: UFV, 2015. p. 251-284.

MANTOVANI, E. C.; MONTES, D. R. P.; VIEIRA, G. H. S.; RAMOS, M. M. ; SOARES, A. A. Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em cristalina-go, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação. **Engenharia Agrícola**. v. 32, n.1, p.110-120,. 2012.

MARCOLIN, E.; GENROJUNIOR, S. A.; MACEDO, V. R. M. Eficiência do uso da água em função de sistemas de manejo da irrigação em arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO, 7., 2009, Porto Alegre. **Anais...**Porto Alegre: SOSBAI, 2009. 1 CD-ROM.

MATEOS, L. Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, New York, v.18, n. 2, p.73-81, 1998.

MATEUS, G. P.; FELTRAN, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do arroz inundado. **Científica**, v. 34, n. 2, p. 144-149, 2006.

MATTJE, V. M.; FIDELES, R. R.; AGUIAR, R. W. S.; BRANDÃO, D. R.; SANTOS M. M. Evaluation of rice cultivars contrasting in doses of nitrogen in soils of irrigated lowland. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Vol. 4, n.2: p. 126-133, 2013.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CURSICOL, C. A. C.; CORRÊA, J. C. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 867-873, 2003.

MENDOZA, C. J. C.;FRIZONNE, J. A. Economia de energia em irrigação por pivô central em função da melhoria na uniformidade da distribuição de água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v. 6, n. 3, p. 184-197, 2012.

MOLINA, J.; SIKORA, M.; GARUD, N.; FLOWERS, J. M.; RUBINSTEIN, S.; REYNOLDS, A.; HUANG, P.; JACKSON, S.; SCHAAL, B. A.; BUSTAMANTE, C. D.; BOYKO, A. R.; PURUGGANAN, M. D. Molecular evidence for a single evolutionary origin of domesticated rice. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. n. 20,v. 108,p. 8351-8356, 2011.

NOBLE, A. D.; SUZUKI, S.; SODA, W.; RUAYSOONGNERN, S.; BERTHELSEN, S. Soil acidification and carbon storage in fertilized pastures of Northeast Thailand. **Geoderma**. v. 144, p. 248-255, 2008.

NTANOS, D. A.; KOUTROUBAS, S. D. Dry matter and N accumulation and translocation for and Japonica rice under Mediterranean conditions. **Field Crops Research**, v. 74, p 93-101, 2002.

OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C.; PAZ, V. P. S.; SANTOS, C. A. Avaliação de desempenho de sistema pivô central na região oeste da Bahia. **Irriga**. v.9, n. 2, p. 126-135, 2004.

OLIVEIRA, F. G.; LOPES, R. G. N.; MOREIRA, F. G.; FIGUEIREDO, F. P. Influência na uniformidade de irrigação na produção e na rentabilidade de silagem de milho irrigado. **Irriga**. Edição especial: IRRIGA & INOVAGRI, p. 103-108, 2015.

PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectiva futura, In: **Fertirrigação**. Guaíba: Agropecuária, 1999. Cap. 1, p. 11-155.

PARFITT, J.M.B.; PINTO, M.A.B.; TIMM, L.C.; BAMBERG, A.L.; SILVA, D.M. da; BRETANHA, G. Manejo da irrigação por aspersão e desempenho da cultura do arroz. In: VII Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2011. Anais...Balneário Camboriú: EPAGRI/SOSBAI, 2011. p. 461-464.

PASSOS, N. G.; SOUSA, S. A.; LOPES, M. B. S.; VARAVALLLO, M. A.; OLIVEIRA, T. C.; FIDELIS, R. R. Eficiência no uso de nitrogênio em genótipos de arroz em solos de várzea tropical do Estado do Tocantins; **Revista agro@ambiente** On-line, v. 9, n. 1, p.8-16, 2015.

PETRINI, J. A.; AZAMBUJA, I. YH. V.; MAGALHÃOES JUNIOR, A M. de; FAGUNDES, R. R. R.; WINKLER, A. S.; KUHN, R. Estratégias de irrigação para redução do uso da água em arroz irrigado. In: Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado, 8, 2013, Santa Maria. **Anais...Santa Maria SOSBAI**, 2013.pp 1180-1183.

PINTO, Marilia Alves Brito. Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo. 2015. 69 p. Tese (Doutorado em ciência do solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

POCOJESKI, E.; SILVA, L. S. da; BUNDT, A. da C.; MARCHESAN, E.; CAMARGO, E. R.; SCIVITTARO, W. B. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores. **Ciência Rural**, v. 42, n.11, p.1982-1988, 2012.

POCOJESKI, Elisandra. Estimativa do estado nutricional de arroz irrigado por alagamento. Dissertação, (Mestrado em Ciências Agrárias), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

POLETTO, N.; **Absorção e assimilação dos íons amônio e nitrato e os seus efeitos sobre o crescimento e desenvolvimento de cevada e arroz em solução nutritiva**. Porto Alegre, 2008. Tese de doutorado, 168 f., Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

POWER, J. F. (ed). 1987. The role of legumes in conservation tillage systems; **American journal of Alternative Agriculture**; v. 2, p. 44-48; 1087. Madison, Wis.:Soil Conservation Society of America.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORREA, L.; CANTERELLA, H.; SILVA, A. G. Recuperação aparente do nitrogênio de adubos nitrogenados aplicados em capim-marandu. In: 42º Reunião Anual da sociedade de zootecnia, Goiânia. **Anais... Goiás**, 2005. p. 609-612.

QUEIROZ, J. E.; GONÇALVES, A. C. A.; SOUTO, J. S.; FOLEGATTI, M. V.; “Avaliação e monitoramento na salinidade do solo”, In____ **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**; Instituto nacional em ciência e tecnologia em salinidade; Fortaleza – CE; 2010.

RAO, A. N.; JOHNSON, D. E.; SIVAPRASAD, B.; LADHA, J. K.; MORTIMER, A. M.; Weed management in direct-seeded rice. **Advances in Agronomy**. v. 93, p. 153-255, 2007.

REDDY, K. R.; DELAUNE, R. D.; Nitrogen. In____ **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**; Boca Raton: CRC Press. 2008. pag. 254 – 308

RHINE, M. D.; STEVENS, G.; HEISER, J. W.; VORIES, E. Nitrogen fertilization on center pivot sprinkler irrigated rice. **Crop Management**. 2011. doi:10.1094/CM-20111021-01-RS.

RUSSELL, John Blair. Os não metais. In:____ **Química Geral**. 2º Ed. São Paulo: Makron, 1994. p. 986-1045.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; CALDAS, P. P. C.; BOTELHO, T. H. Uso do clorofilômetro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura em arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO. **Anais...Itajaí, Balneário Camboriú. Epagri, 2011. p. 493-496.**

SCHMIDT, E. Nitrification in soil. In:____ **Nitrogen in agricultural soil**. Madison, American Society of Agronomy, 1982. 940p. (Agronomy Series, 22).

SCIVITTARO, W. B.; GONÇALVES, D. R. W.; VALE, M. L. C.; RICORDI, V. G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT; **Ciência Rural**; v. 40, n. 6; 2010a.

SCIVITTARO, W. B.; PARFITT, J. M. B.; SILVA, P. S.; SILVEIRA, A. D. Manejo da adubação Nitrogenada para o Arroz Irrigado por aspersão, **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 177**, Embrapa Clima Temperado, Pelotas-RS, Dezembro, 2012.

SCIVITTARO, W. B.; SILVEIRA, A. D.; FARIAS, M. F. Influência da Umidade do Solo e do Uso de Inibidor de Urease na Recuperação de Nitrogênio e Produtividade de Arroz Irrigado, **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 199**, Embrapa Clima Temperado, Pelotas-RS, Dezembro, 2013.

SCIVITTARO, W. B.; STEINMETZ, S.; TEIXEIRA, J. B.; SILVA, M. T.; CASTILHOS, R. M. V. Manejo da Adubação nitrogenada em cobertura para o arroz irrigado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11., REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. **Anais...Guarapari: SBCS, 2010b.1 CD-ROM.**

SILVA, D. J.; BORGES, A. L. Fertilizantes para fertirrigação. In: **Fertirrigação em fruteiras tropicais**; 1º ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e fruticultura Tropical, 2009.p. 20-36.

SILVA, I. S.; BOHNEN, H.; MARCOLIN, E.; MACEDO, V. R. M.; COJESKI, E. Resposta a doses de nitrogênio e avaliação do estado nutricional do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 13, n. 2, p. 189-194, 2007.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10. Ed. Porto Alegre, SBCS, 2004. 400 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DO ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Porto Alegre: SOSBAI, 2010. 188p.

SOSBAI – SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DO ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Bento Gonçalves: SOSBAI 2014. 189 p.

STEINMETZ, S.; DEIBLERLL, A. N.; SILVA, J. B. Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.2, p.206-211, 2013.

STEINMETZ, S.; CUADRA, S. V.; PEREIRA, C. B.; SANTOS, E. L.; ALMEIDA, I. R. GD Arroz: **Circular técnica nº 162**, Embrapa Clima Temperado; Pelotas – RS; Julho, 2015.

STEVENS, G.; VORIES,E.; HEISER,J.;RHINE, M. Experimentation on cultivation of rice irrigated with a center pivot system. Irrigation: Types, Sources and Problems / Book 1, ISBN 978-953-307-765-9. In-Tech Publ., 2012.

STEVENS, G.; WRATHER, A.; RHINE, M.; VORIES, E.; DUNN, D. Predicting rice yield response to midseason nitrogen with plant area measurements. **Agronomy Journal**, v.100, n. 2, p. 387-392; 2008.

STEVESON, F.J. Origin and distribution of nitrogen in soil. In: **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. Cap. 3. p. 63-122.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVEIRA, P. M. **Cultivo do arroz em terras altas no Estado do Mato Grosso**. Sistema de Produção 7, Embrapa Arroz e Feijão, Setembro de 2006.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. As principais classes de solos identificadas no Rio Grande do Sul. In: **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. p. 37-121.
TAIZ, Lincoln e ZEIGER, Eduardo **Fisiologia Vegetal**. 4ºed. Porto Alegre: Artmed, 2009. p. 570-604.

TAKAY, T.; KONDO, M.; YANO, M.; YAMAMOTO, T. A quantitative trait locus for chlorophyll content and its association with leaf photosynthesis in rice. **Rice**, v. 3, p. 172–180, 2010.

TAN, X.; SHAO, D.; GU, W.; LIU, H.; Field analysis of water and nitrogen fate in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agriculture Water Management**. v. 150, p. 67-80, 2015.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico nº 5).

TEDESCO, Marino J. **MANUAL DE ADUBAÇÃO E DE CALAGEM**. 10º ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 404 p.

VIEIRA, F. A. **Doses de máxima eficiência física e econômica de flor-de-seda no rendimento de caupi-hortaliça**. 2014, 57 p. Dissertação (Mestrado em fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2014.

VILLAS BÔAS, R.L. **Recuperação do nitrogênio da ureia pelo milho: efeito da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação**. 1995. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

VITTI, G. C.; TAVARES JR, J. E.; LUZ, P. H. C.; FAVARIN, J. L.; COSTA, M. C. G. Influência da mistura de sulfato de amônio com ureia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, 2002. p. 663-671.

VOGEL, G. F.; MARTINKOSKI, L.; MARTINS, P. J.; BICHEL, A. Desempenho agrônomo de *Azospirillum brasilense* na cultura do arroz. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.6, n.3, p. 567-578, set./dez. 2013.

VORIES, E. D.; STEVENS, W. E. TACKER, P. L.; GRIFFIN, T. W.; COUNCE, P. A. Rice production with center pivot irrigation. Applied Engineering in **Agriculture**, v.29, 2013. p.51-60.

WARREN, C. R. Organic N molecules in the soil solution: what is known, what is unknown and the path forwards. **Plant Soil**. n. 375, p. 1-19, 2014.

WESTCOTT, M.P.; VINES, K.W.A. Comparison of sprinkler and flood irrigation for rice. **Agronomy Journal**, v.78, n.4, p.637-640, 1986.

XINQIANG, L.; JUNLI, Y.; MIAOMIAO, H.; HUA, L.; LIANG, L. Modeling the fate of fertilizer N in paddy rice systems receiving manure and urea. **Geoderma**, v. 228, p. 54-61, 2014.

YOSHIDA S (1981) Fundamentals of Rice Crop Science. Laguna, Los Baños. 269p.

ZHANG, Y.;TANG, Q.; PENG, S.; XING, D.; QIN. J.; LAZA, R.; BERMENITO, R. P.; Water use efficiency and physiological response of rice cultivars under alternate wetting and drying conditions. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 1-10.

ZHENG, Baojuan. **Using satellite hyperspectral imagery to map soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus**. 2008. 93 f. Dissertação (Master of Science) - University Graduate School, Indiana University, Indiana 2008.

ZHOU, S; NISHIYAMA, K; WATANABE, Y; HOSOMI, M. Nitrogen budget and ammonia volatilization in paddy fields fertilized with liquid cattle waste. **Water, Air & Soil Pollution**. V. 201, n. 4, p. 135-147, 2009

ZOCOLER, J. L.; ORSI, M. A. R.; LIMA, R. C.; RODRIGUES, R. A. F. Variação entre a lâmina de irrigação aplicada e armazenada no solo sob condições de irrigação com baixa uniformidade de distribuição de água. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 171-183, 2013.

Apêndices

Apêndice A: Marchas de crescimento e de absorção de nitrogênio em plantas de arroz nos tratamentos T2, T4 e T5.

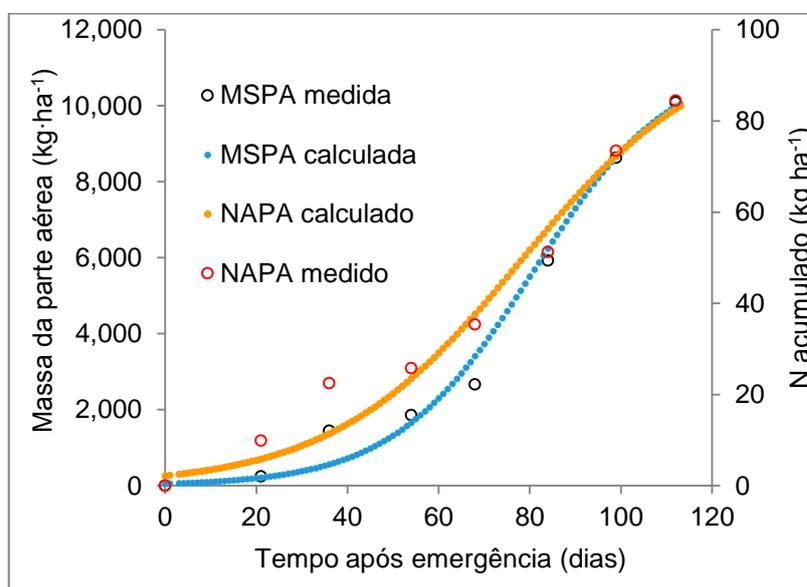


Figura 40 - Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T2 (80 kg ha⁻¹, parcelados em quatro aplicações, entre os estádios V4 e R1).

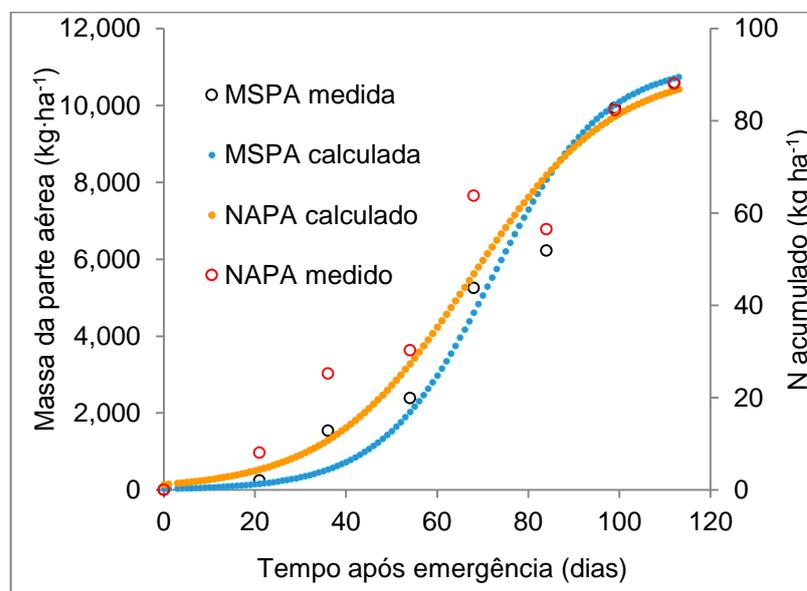


Figura 41 - Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T4 (160 kg ha⁻¹, parcelados em seis aplicações, entre os estádios V4 e R4).

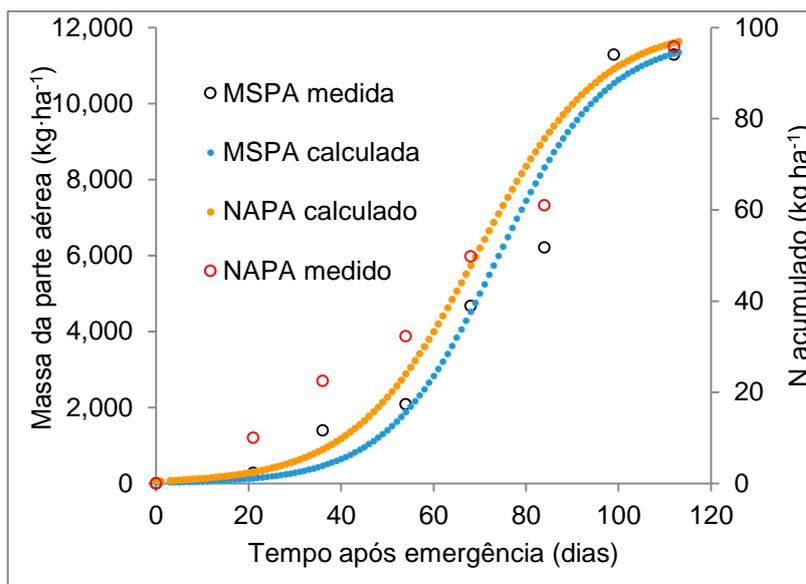


Figura 42 - Valores medidos e calculados para a massa seca da parte aérea da planta (MSPA) e nitrogênio acumulado na parte aérea da planta (NAPA) em função do tempo após a emergência para a cultura do arroz irrigado por aspersão do tratamento T5 (200 kg ha⁻¹, parcelados em seis aplicações, entre os estádios V4 e R4).