**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (*Oryza sativa* L.) visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio

Roberto Paulo Marano

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

**Piracicaba
2014**

Roberto Paulo Marano
Engenheiro em Recursos Hídricos

**Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (*Oryza sativa* L.)
visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr.. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

Piracicaba
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Marano, Roberto Paulo

Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (*Oryza sativa* L.)
visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio / Roberto Paulo
Marano.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2014.
312 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Inundação contínua 2. Inundação intermitente 3. Aspersão 4. Pegada hídrica
5. Percolação I. Título

CDD 633.18
M311m

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

*A minha esposa Sílvia dedico este sonho tão desejado
Seu amor e compreensão foi fundamental
Também dedico a Antonela, Sofia, Federico, Valentina e Sol
a quem ofereço minha vida*

*Com muito amor para meus pais
Angel e Maria Isabel,
que continuam inspirando meus ações
e
com muito carinho para minhas irmãs
Graciela e Maria Rosa
quero também dedicar*

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Silvia, a meus filhos Antonela, Sofia, Federico e Valentina e minha neta Sol, pela paciência, amor e compreensão que tiveram durante este tempo;

A meus pais Angel e Maria Isabel, pela vida, amor, carinho, perseverança, inteireza humana e tantos conselhos que me permitiram lograr este objetivo;

A toda minha numerosa família, que sempre me ajudou e alentou;

À Facultad de Ciencias Agrarias, à Universidad Nacional del Litoral e à ESALQ que me possibilitaram fazer o Doutorado;

Ao Professor Dr. Marcos Vinícius Folegatti, da ESALQ, pela orientação, conhecimento, apoio e amizade oferecidos durante este grato período de estudo;

Aos colegas e amigos Miguel Pilatti, Silvia Imhoff e Pablo Ghiberto, da Facultad de Ciencias Agrarias (UNL), que colaboraram na discussão do experimento, processamento de dados e análise dos resultados;

Aos colegas e amigos Hugo Micheloud e German Camussi, da Facultad de Ciencias Agrarias (UNL), que me apoiaram nas tarefas docentes durante estes anos;

Aos Professores Dr. José Antonio Frizzzone, Dr. Tarlei Arriel Botrel, Dr. Rubens Duarte Coelho, Dr. Sergio Nascimento Duarte, Dr. Paulo Leonel Libardi, Dra. Patrícia Alves Marques, Dr. Jarbas Honório de Miranda e Dr. Quirijn de Jong van Lier, por seus conhecimentos e sabedoria transmitidos nas disciplinas, o que ajudaram a desenvolver esta Tese;

Aos colegas e amigos Ms Sc. João Paulo Francisco e Dr. Cícero Almeida Barboza Júnio, do Programa de Irrigação e Drenagem, pelos aportes a ajuda na correção desta Tese;

Aos colegas e amigos Ms Sc. Gilmar Batista Grigolon e Dr. Antonio Pires de Camargo, do Laboratório de Solos e Irrigação da ESALQ pela confecção de instrumentos utilizados nos experimentos;

A todos os colegas do Programa de Irrigação e Drenagem que me honraram com sua amizade desde o primeiro dia do início das disciplinas, ajudaram a aprender o português, suportaram os erros próprios quando se aprende outro idioma, e momentos de lazer que permitiram uma harmoniosa convivência;

Aos estudantes de Agronomia da Facultad de Ciencias Agrarias (UNL) Noel Dopazo, Ulises Dopazo, Eliano Bianchi, Jonatan Bianchi, Mariano Brondi, Liosnel Faccioli, Pablo Heffner, Hernán Rougier, Martín Savino, Gonzalo Scarpín e Emanuel Zucalli, por sua disposição permanente a trabalhar em San Javier nas duas safras, sendo vital sua colaboração para a obtenção dos resultados desta Tese;

Aos colegas Professores da Facultad de Ciencias Agrarias (UNL), por mais de 20 anos de convivência;

As secretárias Davilmar Colevatti, Beatriz Regina Duarte Novaes e Angela Derigi Silva por o constante apoio recebido;

Ao Sr. Hélio de Toledo Gomes, Sr. Luiz Custódio Camargo e Sr Lino Stenico por sua ajuda na preparação de instrumental de campo, Sr. Antonio Gozzo e Sr. Yván Jaoude pelos momentos de conversação e demais funcionários do Departamento;

À bibliotecária Silvia Zinsly pelo auxílio na normatização da Tese;

A meus amigos Juan, Valéria, Javier e Solange, com quem vivi muitos gratos momentos durante minha permanência em Piracicaba e cuja amizade perdura no tempo;

Ao Governo da Província de Santa Fe pela concessão de subsídio econômico para desenvolver a pesquisa;

Aos Engenheiros Agrônomos Rubén Favot, Marcelo Peart, Raúl Hurani, Alfredo Payne, Darío Vila, José Fernández, Salvador Muzio e Juan Manuel Murillo, por sua colaboração e ajuda nas tarefas de campo;

Ao Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), pelo apoio de seus profissionais;

Ao Establecimiento San Joaquín e Asociación Santafesina de Plantadores de Arroz por o apoio Institucional a este trabalho;

À empresa NAAN-DAN-JAIN Brasil pela doação dos aspersores para o experimento.

"Os homens e os povos decadentes vivem lembrando de onde eles vêm, os grandes homens e povos poderosos só precisam saber onde eles estão indo"

"A imaginação e a experiência vão da mão. Sozinhas não caminham"

"Não se nasce jovem, a juventude deve se adquirir. E sem um ideal, não é possível"

José Ingenieros

"A ciência mais útil é aquela cujo fruto é mais comunicável"

Leonardo da Vinci

"A possibilidade de realizar um sonho é o que torna a vida interessante"

Paulo Coelho

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
RESUMEN	17
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE TABELAS	31
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS.....	39
1 INTRODUÇÃO	47
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	53
2.1 Solos para uso do arroz.....	53
2.2 Características da planta e produtividade.....	53
2.3 Necessidades de água e de irrigação.....	57
2.4 Manejo da irrigação	60
2.5 Pegada hídrica.....	64
2.6 Nutrição mineral.....	65
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	73
3.1 Região de estudo.....	73
3.2 Áreas experimentais	73
3.2.1 Agro-ecossistema Várzea (Vz).....	73
3.2.2 Agro-ecossistema Terraço (Tç).....	74
3.3 Conformação das parcelas	76
3.4 Fonte de água.....	77
3.5 Variedade selecionada e práticas culturais.....	77
3.6 Tratamentos e delineamento estatístico	78
3.7 Balanço hídrico (BH).....	85
3.8 Infiltração e Condutividade hidráulica	89
3.9 Curva de retenção, densidade de solo, resistência à penetração e granulometria	90
3.10 Manejo da irrigação	92
3.11 Fenologia e Taxa de crescimento.....	94
3.12 Índice de Área Foliar (IAF) e Área Foliar Específica (AFE).....	95
3.13 Componentes da produtividade	96
3.14 Análise do tecido vegetal	98
3.15 Dados coletados	100

3.16	Medições do lençol freático	101
3.17	Eficiências de irrigação e de uso da água	101
3.18	Pegada hídrica	102
4	RESULTADOS	105
4.1	Condições meteorológicas	105
4.1.1	Temperaturas e Precipitações Pluviais	105
4.1.2	Radiação Global	108
4.1.3	Ventos	110
4.2	Diagnóstico edáfico	111
4.3	Disponibilidade de macronutrientes no solo	115
4.4	Propriedades físicas do solo	117
4.4.1	Densidade de solo- ρ_s	117
4.4.2	Curva de retenção hídrica-CRH	118
4.4.3	Resistência à Penetração	121
4.4.4	Infiltração e condutividade hidráulica	122
4.4.5	Lençol freático	124
4.5	Aspersão	126
4.5.1	Seleção dos emissores	126
4.5.2	Manejo	128
4.5.3	Funções de infiltração	129
4.5.4	Funcionamento dos tensiômetros	134
4.6	Balanço hídrico	137
4.6.1	Irrigação	138
4.6.2	Necessidades de água	142
4.6.3	Coeficiente único de cultivo	144
4.6.4	Perdas por percolação e escoamento superficial	146
4.7	Desenvolvimento da Cultura	153
4.7.1	Fenologia	153
4.7.1.1	Evolução da biomassa aérea - Safra 2011-12	156
4.7.1.2	Estádio vegetativo	156
4.7.1.3	Estádio reprodutivo	158
4.7.1.4	Colheita	161
4.7.1.5	IAF e AFE	162
4.7.1.6	Produtividade	166
4.7.2	Evolução da biomassa aérea - Safra 2012-13	168

4.7.2.1	Estádio vegetativo	169
4.7.2.2	Estádio reprodutivo	170
4.7.2.3	Colheita	177
4.7.2.4	IAF e AFE	178
4.7.2.5	Produtividade	182
4.7.2.6	Análise de correlação da produtividade	184
4.8	Nutrição	185
4.8.1	Absorção de N - Safra 2012-13	185
4.8.2	Absorção de N - Safra 2011-12	189
4.9	Eficiências de irrigação e de uso da água	191
4.10	Pegada hídrica	193
5	DISCUSSÃO	197
5.1	Caracterização agro ecossistemas	197
5.1.1	Solo.....	197
5.1.2	Variáveis meteorológicas	202
5.1.3	Proposta de rotação	204
5.2	Balanço hídrico	208
5.3	Manejos da água	217
5.3.1	Aspersão	217
5.3.2	Inundação intermitente	222
5.4	Desenvolvimento da cultura.....	226
5.4.1	Fenologia.....	226
5.4.2	Evolução da biomassa aérea	228
5.4.3	IAF e AFE.....	238
5.4.4	Perfilhamento	244
5.4.5	Produtividade e seus componentes	251
5.5	Nutrição nitrogenada.....	255
5.5.1	Interação manejos da água-adubação N-mineralização da MO.....	255
5.5.2	Absorção de N.....	261
5.5.3	Aporte do N nativo.....	267
5.5.4	CN no ciclo	268
5.6	Indicadores de eficiência da água, da irrigação e pegada hídrica	276
6	CONCLUSÕES	283
7	RECOMENDAÇÕES.....	287
	REFERÊNCIAS.....	289

ANEXOS.....303

RESUMO

Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (*Oryza sativa* L.) visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio

O arroz é uma das principais culturas irrigadas no mundo e com as maiores quantidades de água aplicada. No estado de Santa Fe, Argentina, o arroz é a principal cultura irrigada, com eficiências de irrigação muito baixas (25 a 40%). O método tradicional de inundação contínua (Ic) não aproveita as precipitações pluviais, que representam entre 30 a 40% da evapotranspiração real (ET_r). Foram desenvolvidos experimentos em diferentes agro-ecossistemas em San Javier (Santa Fe), objetivando avaliar o arroz com aspersão (AS), inundação intermitente (In) e Ic, visando aumentar as eficiências de irrigação e de uso da água. Na safra 2011-12 predominou Planossolo nátrico (PlaNa), altamente adensado e, na safra 2012-13, Regossolo abrupto (RegAb), com boa drenagem. A variedade de arroz utilizada foi Puitá INTA CL, indica e anaeróbica. A aplicação do Nitrogênio (2011-2012) foi feita de duas maneiras: 20% na semeadura e o restante no perfilhamento, segundo manejo habitual dos produtores (adubação tradicional, AT), e a maneira alternativa, parcelando a adubação (AP). Na safra 2012-2013 foram avaliadas diferentes doses de adubação: T0, testemunha; T1 e T2, com 20 e 40% do requerimento total do N respectivamente. O delineamento estatístico em 2011-12 foi parcelas divididas e fatorial em 2012-13. Em Ic foi mantida uma altura de água constante (6 a 8 cm) e, em In, manteve-se sempre o solo PlaNa saturado e RegAb com potencial mátrico de -10 kPa. Em AS, no PlaNa utilizou-se como controle -25 kPa mudando para -10 kPa no RegAb. Foi realizado um balanço hídrico (BH) determinando, entre outras componentes, lâmina de irrigação bruta (Lib); ET_r e percolação profunda (Perlr). Foi observada a fenologia, avaliada as taxas de crescimento e índice de área foliar. Na colheita foi determinada a produtividade (PG), seus componentes e concentrações de N no tecido vegetal. Foram determinadas as eficiências de irrigação, de uso de água, água virtual e pegada hídrica. Em 2011-12 a PG foi semelhante nos manejos Ic e In (média de 9,8 Mg ha⁻¹), com redução de 24% no AS devido a forte estresse hídrico. No PlaNa a taxa de percolação foi 2,8 mm d⁻¹, resultando a Lib e Perlr dos manejos In e Ic quase iguais, de 6.300 e 1.540 m³ ha⁻¹ respectivamente. Em 2012-13 a PG foi similar em todos os manejos da água (média de 10 Mg ha⁻¹), com resposta significativa às doses de adubação. A taxa de percolação do RegAb triplicou a PlaNa, pelo que a Lib e Perlr dos manejos Ic, In e AS apresentaram grandes diferenças: 11.600, 9.120 e 5.320 m³ ha⁻¹ para Lib e 8.580, 6.190 e 1.980 m³ ha⁻¹ para Perlr. A biomassa aérea teve comportamento contrastante, com crescimento sigmóide em 2011-12, embora linear em 2012-13. A pegada hídrica da produção de arroz em San Javier foi de 261,7 Mm³ ano⁻¹, representando a água azul, verde e cinza 52, 41 e 7%, respectivamente. In apresentou-se como o manejo mais versátil, sendo sua utilização promissora, no entanto AS pode ser utilizado em solos com boa drenagem. Nestes solos seria mais apropriada a adubação parcelada.

Palavras-chave: Inundação contínua; Inundação intermitente; Aspersão, Pegada hídrica; Percolação

ABSTRACT

Water management and fertilization in rice (*Oryza sativa* L.) to increase water use and nitrogen efficiency

Rice is one of the main crops under irrigation in the world, with the highest amount of water applied. In Santa Fe, Argentina, rice is the main crop under irrigation. The traditional method of continuous flooding (CF) does not use rainfall (R), which represents 30 to 40% of the actual evapotranspiration (ETa). Experiments were conducted in different agroecosystems in San Javier, Santa Fe, with the aim of assessing rice cultivation with sprinkle irrigation (SI), intermittent flooding (IF), and CF to increase irrigation and water use efficiencies. In 2011-2012, the predominant soil was typic Natraqualf (Nat), highly compacted, and in 2012-2013 it was Orthent Abruptic (OrtAb), with good drainage. The rice variety used was lowland, Puitá INTA CL. 20% of the fertilizer with N (2011-2012) was applied at sowing and the rest at tillering stage, according to the farmers' usual management (traditional fertilization T) and an alternative management, thus resulting in partial fertilization (PF). In 2012-2013, different doses of N were evaluated: T0, no fertilizer; T1 and T2, with 20 and 40% of the total N requirement, respectively. In 2011-2012, the statistical design consisted of split plots, while in 2012-2013 the design was a factorial one. In CF ponded water was maintained at a constant height of 6-8 cm during the whole cycle, whereas in IF Nat was always saturated or with -10 kPa in the case of OrtAb. In SI treatments, -25 kPa was used as control in Nat, changing to -10 kPa in OrtAb. A water balance (WB) was made, determining, among other components, gross irrigation depth (Gld), ETa, and deep percolation arising from irrigation (DPir). Phenology was observed, and growth rates and leaf area index were evaluated. Yields (Y, 14%), its components, and the concentrations of nitrogen in plant tissues were determined at harvest time. The efficiencies of irrigation, water use, and water footprint were determined. In 2011-2012, Y was similar in CF and IF managements (average of 9.8 Mg ha⁻¹), with a 24% reduction in SI due to strong water stress. Nat had a percolation of 2.8 mm day⁻¹, thus Gld and DPir in IF and CF managements were very similar — 6,300 and 1,540 m³ ha⁻¹, respectively. In 2012-2013, Y was similar in all water managements (average of 10 Mg ha⁻¹), with a significant response to fertilization rates. The percolation of OrtAb tripled that of Nat, so Gld and DPir in CF, IF, and SI systems had significant differences: 11,600, 9,120, and 5,320 m³ ha⁻¹ for Gld; and 8,580, 6,190, and 1,980 m³ ha⁻¹ for DPir. The aboveground dry weight had a contrasting behavior, with a sigmoidal growth in 2011-2012 and a linear growth in 2012-2013. The water footprint of rice production in San Javier was 261.7 Mm³ year⁻¹ — blue, green, and gray water representing 52, 41, and 7%, respectively. IF management was the most versatile, being a promising technique to be used in the field, while SI can be used in soils with good drainage. In these soils, splitting fertilization would be more appropriate.

Keywords: Continuous flooding; Intermittent flooding; Sprinkle irrigation; Water footprint; Percolation

RESUMEN

Manejos de riego y fertilización en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) para incrementar la eficiencia de uso del agua y del nitrógeno

El arroz es uno de los principales cultivos bajo riego en el mundo, con las mayores cantidades de agua aplicada. En Santa Fe, Argentina, también es el principal cultivo irrigado, con eficiencias de riego muy bajas (25 a 40%). El método tradicional de riego es inundación continua (Ic), el cual no aprovecha las precipitaciones, que representan 30 a 40% de la evapotranspiración real (ET_r). Fueron llevados a cabo experimentos en campo de productores en San Javier (Santa Fe), con el objetivo de evaluar el arroz con aspersión (AS), inundación intermitente (In) e Ic. En 2011-12 el suelo predominante fue Natracuall típico (Nat), altamente compactado y en 2012-13 fue Orthent abrupto (OrtAb), con buen drenaje. La variedad de arroz utilizada fue Puitá INTA CL, anaeróbica. La aplicación del fertilizante nitrogenado (2011-12) fue 20% en siembra y 80% en macollaje, según el manejo tradicional (FT) y otro alternativo, dividiendo la fertilización (FP). En 2012-2013 fueron evaluadas diferentes dosis (DF) con N: T₀, testigo; T₁ y T₂, con 20 y 40 % del requerimiento total de N respectivamente. El diseño estadístico fue parcelas divididas en 2011-12 y factorial en 2012-13. En Ic fue mantenida una altura de agua constante (6 a 8 cm) y con manejo In se mantuvo siempre el suelo saturado en Nat y con -10 kPa en OrtAb. En AS y Nat se utilizó como control Ψ_m -25 kPa, cambiando a -10 kPa en OrtAb. Fue realizado un balance hídrico (BH) determinando, entre otras componentes, lámina de riego bruta (LR_b), ET_r y percolación profunda con origen en el riego (Per_{lr}). Fue observada la fenología, evaluadas las tasas de crecimiento e índice de área foliar. A cosecha fueron determinados los rendimientos (RG, 14%), sus componentes y las concentraciones de nitrógeno en el tejido vegetal. Fueron determinadas las eficiencias de riego, de uso del agua y huella hídrica (HH). En 2011-12, RG fue semejante en los manejos Ic e In (promedio de 9,8 Mg ha⁻¹), con reducción de 24% en AS debido a importante estrés hídrico. Nat tuvo percolación de 2,8 mm día⁻¹, resultando muy similares LR_b y Per_{lr} en los manejos In e Ic, 6.300 y 1.540 m³ ha⁻¹ respectivamente. En 2012-13, RG fue similar en todos los manejos de agua (promedio 10 Mg ha⁻¹), con respuesta significativa a las dosis de N. La percolación en OrtAb triplicó a Nat, por lo que LR_b y Per_{lr} de los manejos Ic, In y AS tuvieron grandes diferencias: 11.600, 9.120 y 5.320 m³ ha⁻¹ para LR_b y 8.580, 6.190 y 1.980 m³ ha⁻¹ para Per_{lr}. El crecimiento de la biomasa aérea total fue de tipo sigmoide en 2011-12 y de tipo lineal en 2012-13. HH de la producción de arroz en San Javier fue 261,7 Mm³ ano⁻¹, representando el agua azul, verde y gris 52, 41 y 7% respectivamente. El manejo In fue el más versátil, siendo promisorio su utilización a campo, mientras que AS puede ser utilizado en suelos con adecuado drenaje. En estos suelos podría ser apropiado dividir la fertilización.

Palabras claves: Inundación continua; Inundación intermitente; Aspersión; Huella hídrica; Percolación

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Províncias produtoras de arroz na Argentina	48
Figura 2 - Superfície de arroz colhida total de Argentina e de cada província orizícola (Fonte: ACPA, 2013)	48
Figura 3 - Produção de arroz em casca total de Argentina e de cada província orizícola (Fonte: ACPA, 2013)	49
Figura 4 - Produtividade média de arroz em casca safras 2005-05 até 2012-13 em Santa Fe e Argentina (Fonte: ACPA, 2013)	50
Figura 5 - Esquema conceitual de arroz de terras baixas com inundação contínua (Ic) depós do início da irrigação, com lâmina permanente (h) em superfície e saturação do solo até o lençol freático	59
Figura 6 - Esquema conceitual de entradas, saídas e processos do ciclo do N em arroz de terras baixas com inundação contínua (Ic), com lâmina permanente (h) em superfície e saturação do solo até o lençol freático ...	66
Figura 7 - Ciclo do N num ecossistema com inundação contínua. (Adaptado de Reddy, 1982)	67
Figura 8 - Agro-ecossistema Várzea (Vz) com área experimental com solo PlaNa, Río San Javier a leste e córrego Saladillo a oeste. Fonte: Google Earth, ingresso 10-01-14	75
Figura 9 - Detalhe área experimental no agro-ecossistema Várzea (Vz) com solo PlaNa e lote com curvas de nível. Fonte: Google Earth, ingresso 10-01-14	75
Figura 10 - Detalhe área experimental no agro-ecossistema Terraço (Tç) com solo RegAb e lote sistematizado com declividade zero. Fonte: Google Earth, ingresso 10-01-14	76
Figura 11 - Rolo taipero e grade de discos para conformação das taipas	77
Figura 12 - Moto-bomba, filtro e tubaria principal de distribuição da irrigação	77
Figura 13 - Montagem da tubulação e hidrômetros	79
Figura 14 - Sistema de distribuição da tubulação com hidrômetros nas parcelas	79
Figura 15 - Croqui desenho experimental parcela dividida com blocos completos aleatórios, safra 2011-12	83
Figura 16 - Croqui desenho experimental safra 2012-13 modelo fatorial com blocos completos aleatórios	84

Figura17 - Temperaturas mínimas (Tmin), máximas (Tmax, °C) diárias do ar e precipitação pluviométrica (PP) diária na safra 2011-12 em San Javier, Santa Fe, Argentina	106
Figura 18 - Temperaturas mínimas (Tmin), máximas (Tmax, °C) diárias do ar e precipitação pluviométrica (PP) diária na safra 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina	107
Figura 19 - Radiação Global (RG) diária nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina.....	109
Figura 20 - Velocidades de vento (Vv, m s ⁻¹) médias diárias nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina	110
Figura 21 - Solo PlaNa no momento de extração de amostras	114
Figura 22 - Solo RegAb no momento de extração de amostras	114
Figura 23 - Curva de retenção da camada superficial (0 - 0,11 m) e sub-superficial (0,11-0,25) do solo PlaNa, safra 2011-12.....	119
Figura 24 - Curva de retenção das camadas 0 - 0,11; 0,1-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m do solo RegAb, safra 2012-13.....	120
Figura 25 - Valores médios de umidade de solo observados e ajustados segundo equação de retenção da camada superficial (0-0,11 m) do solo PlaNa, safra 2011-12.....	120
Figura 26 - Valores médios de umidade de solo observados e ajustados segundo equação de retenção da camada superficial (0-0,11 m) do solo PlaNa, safra 2011-12	121
Figura 27- Resistência à Penetração (RP) obtida em laboratório para diferentes conteúdos de água no solo nas camadas: 0-0,11 e 0,11-0,25 m para solo PlaNa, safra 2011-12.....	122
Figura 28 - Resistência à Penetração (RP) obtida em laboratório para diferentes conteúdos de água no solo nas camadas: 0-0,1; 0,1-0,19; 0,19-0,4 e 0,4-0,6 m para solo RegAb, safra 2012-13.....	122
Figura 29 - Teste de infiltração com duplos anéis no solo RegAb (A). B foto permite observar o solo expandido que ficou no interior do anel após que este fosse removido	124
Figura 30 - Porcentagem de fluxo (%) segundo diferentes raios de poros para ambos os solos, PlaNa e RegAb, obtidos a partir das condutividades hidráulicas nas tensões 0, 1,5 e 3 cm.	124

Figura 31 - Variação profundidade lençol freático solo PlaNa, safra 2011-12, San Javier, Argentina.....	125
Figura 32 - Variação profundidade lençol freático solo RegAb, safra 2012-13, San Javier, Argentina.....	126
Figura 33 - Aspersores montados no centro da parcela, altura porta-aspersor 1,5 m com angulo de 360°, safra 2011-12.....	128
Figura 34 - Aspersores montados no extremo da parcela, altura porta-aspersor 0,5 m com angulo de 90°, safra 2012-13	128
Figura 35 - Representação da velocidade de infiltração (f), infiltração acumulada (F) e pluviometria média dos aspersores (PI) em função do tempo (t) para o solo PlaNa. Tp: tempo teórico do começo do empoçamento	132
Figura 36 - Representação da velocidade de infiltração (f), infiltração acumulada (F) e pluviometria média dos aspersores (PI) em função do tempo (t) para o solo RegAb. Tp: tempo teórico do começo do empoçamento	133
Figura 37 - Dados observados no campo e curva de calibração linear dos transdutores, em ordenadas a tensão (T) e em abscissas sinal digital (SD).....	135
Figura 38 -Funcionamento durante 54 h (8 ao 10-01-13) de dois tensiômetros a duas profundidades: 0-0,10 m e 0,10 a 0,20 m, instalados numa parcela de aspersão com transdutores de pressão e aquisição automática de dados cada 30 min	136
Figura 39 -Funcionamento durante 10 dias (28-12-12 ao 6-01-13) de dois tensiômetros a duas profundidades: 0-0,10 m e 0,10 a 0,20 m, instalados numa parcela de aspersão com transdutores de pressão e aquisição automática de dados cada 30 min.....	137
Figura 40 - Esquema conceitual do movimento da água nas parcelas irrigadas	147
Figura 41 - Curvas de condutividade hidráulica não saturada $K_h(\theta)$, em relação ao conteúdo de água (θ) para as camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 m do solo PlaNa, San Javier, Argentina.....	149
Figura 42 - Curvas de condutividade hidráulica não saturada $K_h(\theta)$, em relação ao conteúdo de água (θ) para as camadas 0-0,10, 0,10-0,19, 0,19-0,4, 0,4-0,6 m do solo RegAb, San Javier, Argentina.....	149
Figura 43 - Colmos no estádio R6 da escala de Counce et al. (2000) para o manejo aspersão, esquerda, e inundação, direita.....	160

- Figura 44 - Evolução da biomassa de folha verde (BFV) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2011-12, San Javier, Argentina. IP início do perfilhamento, MP máximo perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) 163
- Figura 45 - Evolução índice de área foliar (IAF) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2011-12, San Javier, Argentina. MP máximo perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Letras diferentes em cada estágio indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD 164
- Figura 46 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para aspersão (AS) e inundação no estágio máximo perfilhamento (MP) da safra 2011-12, San Javier, Argentina 165
- Figura 47 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para aspersão (AS) e inundação no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2011-12, San Javier, Argentina 165
- Figura 48 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para aspersão (AS) e inundação no estágio R6 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2011-12, San Javier, Argentina 165
- Figura 49 - Evolução da área foliar específica (AFE) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2011-12, San Javier, Argentina. MP máximo perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD 166
- Figura 50 - Produtividade (PG) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD 167
- Figura 51 - Fertilidade de espiguetas (FE) e número de espiguetas totais (NEt) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento

ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes para cada variável indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD

..... 167

Figura 52 - Biomassa aérea total (BAT) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estádio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças estatísticas ($P < 0,05$) segundo teste LSD ($P < 0,05$) 171

Figura 53 - Biomassa de folhas verdes (BFV) em R2 para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estádio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças estatísticas ($P < 0,05$) segundo teste LSD ($P < 0,05$) 171

Figura 54 - Número de colmos (Nºcolmos m⁻²) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estádio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD ($P < 0,05$) 172

Figura 55 - Biomassa de bainha e colmo (BB+C) para os tratamentos de adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estádio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD ($P < 0,05$) 173

- Figura 56 - Biomassa de folha verde (BFV) média dos colmos para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estádio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD (P<0,05) 174
- Figura 57 - Biomassa aérea total (BAT) média dos colmos para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estádio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD (P<0,05) 175
- Figura 58 - Evolução índice de área foliar (IAF) para testemunha T0, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Letras diferentes em cada estádio indicam diferenças significativas (P<0,05) segundo teste LSD 179
- Figura 59 - Evolução índice de área foliar (IAF) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Letras diferentes em cada estádio indicam diferenças significativas (P<0,05) segundo teste LSD 180
- Figura 60 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para o conjunto dos tratamentos no estádio mediados de perfilhamento da safra 2012-13, San Javier, Argentina 180
- Figura 61 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para o conjunto dos tratamentos nos estádios R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000), safra 2012-13, San Javier, Argentina 180

- Figura 62 - Evolução da área foliar específica (AFE) para testemunha T0, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N, segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas (P<0,05) segundo teste LSD 181
- Figura 63 - Evolução da área foliar específica (AFE) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas (P<0,05) segundo teste LSD 181
- Figura 64 - Produtividade (PG) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes maiúsculas nos tratamentos de adubação com N e minúsculas nos manejos da água, indicam diferenças significativas (P<0,05) segundo teste LSD 182
- Figura 65 - Número de espiguetas totais (NEt) e fertilidade de espiguetas (FE) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Nota – Valores médios de cada variável com letras diferentes maiúsculas nos tratamentos de adubação com N e minúsculas nos manejos da água, indicam diferenças significativas (P<0,05) segundo teste LSD 183

- Figura 66 - Eficiência fisiológica total do N (EFisTN), e dos grãos (EFisGN), eficiência de uso do N total (EUNT) e dos grãos (EUNG) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios de cada eficiência com letras diferentes maiúsculas nos tratamentos de adubação com N e minúsculas nos manejos da água, indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD 188
- Figura 67 - Recuperação aparente do N (RAN) e eficiência agronômica do N (EAN) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD 188
- Figura 68 - Eficiência fisiológica total do N (EFisTN), e dos grãos (EFisGN), eficiência de uso do N total (EUNT) e dos grãos (EUNG) para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina. Valores médios de cada eficiência com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) segundo teste LSD. A variável EUNG não teve distribuição normal segundo teste de Shapiro-Wilks modificado (InfoStat, 2012), porquanto foi utilizada a transformação $EUNG = LOG(EUNG)$ 191
- Figura 69 - Proporções da pegada hídrica verde (PHv), azul (PHaz) e cinza (PHcz) em relação ao total da produção de arroz em casca em San Javier, Argentina 194
- Figura 70 - Cobertura de herbáceas nativas, em dezembro, em agro-ecossistema Vz com precipitações pluviais adequadas 205
- Figura 71 - Condição extrema de seca no inverno de 2008 na região norte de Santa Fe, em agro-ecossistema Sub-meridional, semelhante à Vz 205
- Figura 72- (a)Trigo de inverno crescendo sob palha de milho e (b) conformação de bordos elevados segundo sistema de laboreio e máquinas disponíveis 205

- Figura 73 - Componentes de entrada, lâmina de irrigação bruta (Lib) e precipitações pluviais (PP) e de saídas, evapotranspiração real (ETr) e percolação devido à irrigação (PerIr) do balanço hídrico, para os manejos com inundação, na safra 2011-12, San Javier, Argentina210
- Figura 74 - Componentes de entrada, lâmina de irrigação bruta (Lib) e precipitações pluviais (PP) e de saídas, evapotranspiração real (ETr), percolação devido à irrigação (PerIr) e a precipitações pluviais (PerP) do balanço hídrico na safra 2011-12, San Javier, Argentina212
- Figura 75 - Evolução do coeficiente de cultivo (Kc) em relação aos dias à semeadura (DAS) para a média dos tratamentos nas safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina215
- Figura 76 - Pivô central em São Borja, RS, Brasil218
- Figura 77 - Esquema de manejo semanal com irrigação intermitente num campo com produção de arroz226
- Figura 78 - Curva de crescimento da biomassa aérea total (BAT) e da palha (BPa) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic), inundação intermitente (In) segundo diferentes estádios ontogênicos, iniciação do perfilhamento (IP), máximo perfilhamento (MP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000) para a cultura de arroz da safra 2011-12 em San Javier, Argentina230
- Figura 79 - Curva de crescimento da biomassa aérea total (BAT) e da palha (BPa) para testemunha (T0) e doses de N T1 e T2 segundo diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), para a cultura de arroz da safra 2012-13 em San Javier, Argentina231
- Figura 80 - Curva de crescimento da biomassa aérea total (BAT) e da palha (BPa) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic), inundação intermitente (In) segundo diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), para a cultura de arroz da safra 2012-13 em San Javier, Argentina ...231

- Figura 81 - Curva de evolução do índice de área foliar (IAF) segundo diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), máximo perfilhamento (M)) R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000), para a cultura de arroz das safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Argentina- Símbolo quadrados cor cinza representam os valores medidos de IAF, a curva cor negro o melhor ajuste determinado e as barras indicam o desvio padrão para cada estágio..... 244
- Figura 82 - Evolução dos colmos desde emergência (E), início de perfilhamento (IP), máximo perfilhamento (MP), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) e colheita na safra 2011-12, San Javier, Argentina 245
- Figura 83 - Evolução dos colmos desde emergência (E), mediados de perfilhamento (MeP), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) e colheita na safra 2012-13, San Javier, Argentina..... 247
- Figura 84 - Evolução dos colmos desde emergência (E), início do perfilhamento (IP), perfilhamento ativo (PA), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) e colheita nas safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina. Em cada estágio da safra 2011-12 foi feita a média com N colmos dos manejos com inundação e das doses T1 e T2 da safra 2012-13. A média dos colmos em IP na safra 2012-13 foi estimada em função da densidade de emergência das plântulas. A linha negra contínua indica a projeção das panículas obtidas na colheita na safra 2011-12 e a linha negra de pontos na safra 2012-13 250
- Figura 85 - Relação da concentração de N na planta (CNplanta) e a biomassa aérea total (BAT) na colheita de arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina 270
- Figura 86 - Relação da concentração de N na planta (CNplanta) e a biomassa aérea total (BAT) para diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), safra 2012-13, San Javier, Argentina 271
- Figura 87 - Relação da absorção de N na planta (AbNT) e a biomassa aérea total (BAT) para diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), safra 2012-13, San Javier, Argentina 271

- Figura 88 - Relações entre produtividade dos grãos (PG) e absorção total de N na biomassa aérea considerando em conjunto os tratamentos T1-T2, e a testemunhada (safra 2012-13) e os manejos Ic-In e AS (safra 2011-12), San Javier, Argentina. As curvas superiores (máxima diluição de N) correspondem aos valores referidos por Witt et al. (1999), dil 2,5% Witt e aos obtidos em San Javier, dil 2,5% SJ. As curvas inferiores (máxima acumulação de N) correspondem aos valores referidos por Witt et al. (1999), acum 2,5% Witt e aos obtidos em San Javier, acum 2,5% SJ273
- Figura 89 - Escala fenológica para os estádios de crescimento e mudanças morfológicas da planta de arroz305
- Figura 90 -Triângulo de classificação textural e densidade de solos306

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Posição dos principais países produtores de arroz ano 2012	47
Tabela 2 - Médias mensais da temperatura do ar média (Tm), máxima (Tmax) e mínima (Tmin), nas safras 2011-12 e 2012-13 e temperaturas médias históricas (Tm _{his} , série 1991-2012) em San Javier, Santa Fe, Argentina	105
Tabela 3 - Umidade relativa (UR) média e precipitação pluviométrica (PP) mensal-safras 2011-12 e 2012-13 e precipitação pluviométrica mensal histórica (PP _{his} série 1991-2012) em San Javier, Santa Fe, Argentina	108
Tabela 4 - Radiação global (RG) média mensal nas safras 2011-12 e 2012-13, em San Javier, Santa Fe, Argentina	109
Tabela 5 - Radiação Global (RG) acumulada nos estádios: I, desde emergência até diferenciação da panícula; II, desde diferenciação até floração e III, desde floração até maturidade fisiológica, nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina.....	109
Tabela 6 - Velocidade de vento (Vv, m s ⁻¹) média diária e N° de dias com Vv < 2 m s ⁻¹ , 2 < Vv < 4 m s ⁻¹ e Vv > 4 m s ⁻¹ para os meses de outubro a março nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina	111
Tabela 7 - Valores de matéria e carbono orgânico (MO e CO), nitrogênio total (Nt%), Fósforo (P), pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Porcentagem de Sódio Trocável (PST), saturação de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ e K ⁺ teores de areia, argila e silte para diferentes camadas do solo PlaNa	112
Tabela 8 - Percentagem de areia, argila e silte e classificação textural para diferentes camadas do solo PlaNa	113
Tabela 9 - Matéria Orgânica (MO) e Carbono Orgânico (CO), Nitrogênio total (Nt %), Fósforo (P), pH, Condutividade Elétrica do extrato de saturação (CEe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Porcentagem de Sódio Trocável (PST), Saturação de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ e K ⁺ para diferentes camadas do solo RegAb.....	114
Tabela 10 - Percentagem de areia, argila e silte e classes texturais para diferentes camadas do solo RegAb	115

Tabela 11 - Estimativa do Nitrogênio nativo (N _{nat}), Nitrogênio mineralizável (N _{min}), Nitrogênio de nitratos (NO _{3s}), Nitrogênio ativo (N _{act}) e Nitrogênio total (N _t), para diferentes camadas e densidades (ρ_s) dos solos PlaNa e RegAb.....	115
Tabela 12 - Estimativa de Fósforo (P) e Potássio (K), em % e kg ha ⁻¹ , para diferentes camadas e densidades (ρ_s) dos solos PlaNa e RegAb.....	116
Tabela 13 - Densidades do solo (ρ_s) e porosidade total (Pot) nas camadas superficiais do solo PlaNa e RegAb para diferentes datas durante as safras 2011-12 e 2012-13	118
Tabela 14 - Parâmetros da curva de retenção de Genuchten para as camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 m do solo PlaNa e 0-0,1; 0,1-0,19; 0,19-0,4 e 0,4-0,6 m do solo RegAb	119
Tabela 15 - Valores médios de condutividade hidráulica (Kh) e coeficiente de variação (CV) nas tensões 0, 1,5 e 3 cm	123
Tabela 16 - Lâmina infiltrada (Fs) segundo diferentes combinações de conteúdo de água no solo em saturação (θ_s) e potencialmátrico (Ψ_{mf}) para o PlaNa, San Javier, Argentina.....	131
Tabela 17 – Lâmina infiltrada (Fs) segundo diferentes combinações de conteúdo de água no solo em saturação (θ_s) e potencialmátrico Ψ_{mf} para o solo RegAb, San Javier, Argentina	133
Tabela 18 – Lâminas de irrigação bruta (Lib) e líquida (Li _L) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e momentos de aplicação do N na safra 2011-12, San Javier, Argentina	140
Tabela 19 – Lâminas de irrigação bruta (Lib) e líquida (Li _L) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e doses de adubação com N na safra 2012-13, San Javier, Argentina	141
Tabela 20 - Evapotranspiração real (ET _r) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e momentos de aplicação do N, Evapotranspiração de referência (ET _o) e Precipitação total (PP) na safra 2011-12, San Javier, Argentina	143
Tabela 21 - Evapotranspiração real (ET _r) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e doses de adubação com N, Evapotranspiração de referência (ET _o) e Precipitação total (PP) na safra 2012-13, San Javier, Argentina	144

Tabela 22 – Coeficiente único de Cultivo (K_c) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e momentos de aplicação do N na safra 2011-12, San Javier, Argentina	145
Tabela 23 – Coeficiente único de Cultivo (K_c) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e doses de adubação com N na safra 2012-13, San Javier, Argentina	146
Tabela 24 – Condutividades hidráulicas não saturadas K_h (θ) e conteúdos de água a capacidade de campo (θ) para o solo RegAb e PlaNa, San Javier, Argentina	150
Tabela 25 - Lâminas de água armazenadas (mm) a diferentes tensões (kPa) segundo CRH para as camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 do solo PlaNa e 0-0,1; 0,1-0,19; 0,19-0,4 e 0,4-0,6 do solo RegAb	151
Tabela 26 – Perdas por percolação profunda devida à irrigação (PerIr) e às precipitações (PerP) nas safras 2011-12 e 2011-13, San Javier, Argentina	153
Tabela 27 – Estádios ontogênicos do cultivar Puitá INTA CL observados a campo e segundo Somas Térmicas (ST) totais, considerando tanto os dias após da semeadura (DAS), quanto à emergência (DAE) e a duração de cada estágio (DE), nas safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina	155
Tabela 28 – Evolução biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa bainha e colmo (BB+C) e número de colmos (N° colmos) para o estágio vegetativo do arroz dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) da safra 2011-12, San Javier, Argentina	157
Tabela 29 – Evolução biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa bainha e colmo (BB+C), biomassa de folha seca (BFS), biomassa de panícula (BP), número de colmos (N° colmos) e panículas (NPan) para o estágio reprodutivo do arroz dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In), safra 2011-12, San Javier, Argentina	161
Tabela 30– Evolução biomassa aérea total (BAT), biomassa da palha (BPa), biomassa de panícula (BP), número de panículas (NPan) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação	

(MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina.....	162
Tabela 31 – Índice de colheita (IC) e massa de 1000 grãos (M1000) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina.....	168
Tabela 32 – Biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa de bainha e colmo (BB+C) e número de colmos (Nºcolmos) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In), no estágio vegetativo do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina	170
Tabela 33 – Biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa de bainha e colmo (BB+C), biomassa de folha seca (BFS), biomassa de panícula (BP) e número de panículas (NºPan) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) no estágio R6 da escala de Counce et al. (2000) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina.....	176
Tabela 34 – Biomassa aérea total (BAT), biomassa de panícula (BP), biomassa de palha (BP _a) e número de panículas (NºPan) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina.....	178
Tabela 35 – Massa de 1000 grãos (M1000) e índice de colheita (IC) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina	184
Tabela 36 – Absorção de N em grãos (AbNG), em palha (AbNP _a) e total (AbNT), concentração de N em grãos (CN grãos) e palha (CN palha) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina	186
Tabela 37 – Índice de colheita do N (ICN), eficiência interna do N (EIN), relação inversa do N (RIN) e eficiência de absorção de N (EAbN) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina	187

Tabela 38 – Absorção de N em grãos (AbNG), em palha (AbNP _a) e total (AbNT), concentração de N em grãos (CN grãos) e palha (CN palha) para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina.....	189
Tabela 39 – Índice de colheita do N (ICN), eficiência interna do N (EIN), relação inversa do N (RIN) e eficiência de absorção de N (EAbN)) para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina.....	190
Tabela 40 – Eficiência de aplicação da irrigação (EF _a), Eficiência total da água (ET _a), Eficiência de uso da água (EU _a), Produtividade da água (Pa), Produtividade da água azul (Paz), para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina	192
Tabela 41 – Eficiência de aplicação da irrigação (EF _a), Eficiência total da água (ET _a), Eficiência de uso da água (EU _a), Produtividade da água (Pa), Produtividade da água azul (Paz), para testemunha (T ₀), doses T ₁ e T ₂ e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina.....	193
Tabela 42 – Volumes de água verde (AU _v), azul (AU _{az}) e cinza (AU _{cz}) utilizados na produção de arroz em casca e percolação devida à irrigação (PerI _r) e as precipitações pluviais (PerP) dos agro-ecossistemas Várzea (Vz) e Terraço (Tç) em San Javier, Argentina.....	194
Tabela 43 – Pegada hídrica da produção de arroz em casca em Santa Fe verde (PHS _v), azul (PHS _{az}), cinza (PHS _{cz}) e total (PHS _c), volumes de água azul (Per _{az}), verde (Per _v) e total (Per _T) percolados e volume total disponível (VTD) nos agro-ecossistemas Várzea (Vz) e Terraço (Tç).....	194
Tabela 44– Pegada hídrica verde (PH _v), azul (PH _{az}), cinza (PH _{cz}) e total da cultura (PH _c) do arroz em casca e volume percolado por unidade de arroz casca produzido com origem na irrigação (PerV _{az}), nas precipitações (PerV _v) e total (PerV _t) nos agro-ecossistemas Várzea (Vz) e Terraço (Tç) em San Javier, Argentina.....	195

Tabela 45 – Radiação global (RG) total e média diária do ciclo, temperatura média (Tm), mínima (Tmin) e máxima (Tmax) para diferentes sítios do mundo com produção de arroz ANA	203
Tabela 46 - Dias Após da Emergência (DAE), e Somas Térmicas (ST) totais segundo estádios ontogênicos obtidos para o cultivar Puitá INTA CL em regiões de Entre Ríos (Argentina) e Sul do Brasil (IRGA 417)	228
Tabela 47 – Taxas de crescimento da biomassa aérea total (TCBAT) segundo diferente estádios ontogênicos e ciclo completo para as safras 2011-12 e 1012-13 em San Javier, Argentina	233
Tabela 48 – Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), índice de colheita (IC), percentagem de espiguetas férteis (%E), fertilidade de espiguetas (FE), número de espiguetas totais (NEt), número de panículas a colheita (NºPan), biomassa aérea total (BAT), número de colmos no estágio R2 (NºcoR2), biomassa de folhas verdes no estágio R2 (BFV-R2), biomassa aérea total no estágio R2 (BAT-R2), índice de área foliar no estágio R2 (IAF-R2) e biomassa de bainha + colmo no estágio R2 (BB+C-R2), para a safra 2012-13, San Javier, Argentina	307
Tabela 49 – Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), índice de colheita (IC), percentagem de espiguetas férteis (%E), fertilidade de espiguetas (FE), número de espiguetas totais (NEt), número de panículas a colheita (NºPan), biomassa aérea total na colheita (BAT-C), número de colmos no estágio R2 (NºcoR2), biomassa de folhas verdes no estágio R2 (BFV-R2), biomassa aérea total no estágio R2 (BAT-R2), índice de área foliar no estágio R2 (IAF-R2) e biomassa de bainha + colmo no estágio R2 (BB+C-R2), para a safra 2011-12, San Javier, Argentina	308
Tabela 50– Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), biomassa de folhas verdes no estágio R6 (BFV-R6), biomassa aérea total no estágio R6 (BAT-R6), índice de área foliar no estágio R6 (IAF-R6), biomassa de bainha + colmo no estágio R6 (BB+C-R6), biomassa de panículas no estágio R6 (BP-R6), biomassa de folhas secas no estágio R6 (BFS-R6), número de colmos em perfilhamento ativo (Nºcolm PA), índice de área foliar em perfilhamento ativo (IAF PA), absorção de N total (AbNT) e nos grãos (AbNG) para a safra 2012-13, San Javier, Argentina	309

Tabela 51– Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), biomassa de folhas verdes no estágio R6 (BFV-R6), biomassa aérea total no estágio R6 (BAT-R6), índice de área foliar no estágio R6 (IAF-R6), biomassa de bainha + colmo no estágio R6 (BB+C-R6), biomassa de panículas no estágio R6 (BP-R6), biomassa de folhas secas no estágio R6 (BFS-R6), número de colmos em perfilhamento ativo (Nºcolm PA), índice de área foliar em perfilhamento ativo (IAF PA), absorção de N total (AbNT) e nos grãos (AbNG) para a safra 2011-12, San Javier, Argentina.....	310
Tabela 52 – Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), lâmina de irrigação bruta (Lib), líquida (LiL), evapotranspiração real (ETr) das safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina.....	311
Tabela 53 – Estimativa de absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos (ADNEG), para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina	311
Tabela 54– Estimativa de absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos (ADNEG), para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina.....	312

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

μ - Média populacional

τ - Tensão de água no solo

$(\alpha\beta)_{ij}$ - Efeito devido à interação parcela principal x sub-parcelas

$(\alpha\gamma)_{ik}$ - Efeito devido à interação parcela principal x blocos

Y_{ijk} - Resposta de cada unidade experimental

θ_f - Conteúdo de água no solo no final do período de irrigação

α_i - Efeito devido à parcela principal com momentos de aplicação do N

θ - Conteúdo de água no solo

θ_r - Conteúdo de água residual

θ_s - Conteúdo de água no solo saturado

θ_{cc} - Conteúdo de água no solo em capacidade de campo

θ_i - Conteúdo de água no solo no início de irrigação

ε_{ijk} - Término do erro

β_j - Efeito devido às sub-parcelas com diferentes manejos de água

γ_k - Efeito devido aos blocos

ΔL - Variação da água armazenada na profundidade efetiva das raízes, entre o início e final do período da irrigação

Ψ_m - Potencial mátrico

Ψ_{mf} – Potencial matricial na frente de umedecimento

ρ_p - Densidade de partículas

ρ_s - Densidade de solo

Δz – Variação de altura entre duas taipas contíguas

a' - Quantidade teórica mínima de absorção do N

a_c e b' - Parâmetros empíricos da curva potencial de absorção de nitrogênio

A - Fator manejos da água

A_k , B , a e b - Parâmetros de ajuste equação de Kostiaikov

A_r – Percentagem de argila

Ab_{NG} – Absorção de nitrogênio em grão

Ab_{NPa} - Absorção de nitrogênio em palha

Ab_{NT} - Absorção de nitrogênio total

A_c - Ascensão capilar

ACPA – Associação Correntina de Plantadores de Arroz

ADNEG - Absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos

AE – Arroz de terras altas cultivado em condições aeróbicas, também denominado upland

AF - Área foliar das lâminas individuais

AFE - Área Foliar Específica

ANA – Arroz de terras baixas cultivado em condições anaeróbicas, também denominado lowland

ANAVA - Análise das variâncias do modelo estatístico

AP - Adubação parcelada

AS – Aspersão

AT - Adubação tradicional

AUaz - Volume de água utilizado no processo da evapotranspiração e cuja origem é a irrigação

AUc - Volume de água total utilizado na produção da cultura de arroz

AUcz: Volume de água necessário para diluir o conteúdo de NO_3^- derivado da adubação feita na cultura de arroz até níveis padrões segundo o que a normativa exige

AUv - Volume de água utilizado no processo da evapotranspiração e cuja origem é a fração da PP que infiltra, armazena-se no solo e esta disponível para a cultura

AV : água virtual

B - Fator doses de nitrogênio

B'3 - Clima mesotermal segundo classificação de Thornthwaite

BAT – Biomassa aérea total

BB+C - Biomassa de bainha + caule

BE - Bordos elevados

BFS - Biomassa de folha senescente

BFV - Biomassa de folha verde

BG – Biomassa seca do arroz em casca na colheita

BH - Balanço hídrico

BP – Biomassa da panícula

BPa - Biomassa da palha

C – Comprimento de cada lâmina verde

C2 - Clima sub-úmido úmido segundo classificação de Thornthwaite

CBP - Biomassa de panícula

CEe – Condutividade elétrica do estrato de saturação do solo

CN – Concentração de nitrogênio (CN) de grão e palha

CNO₃⁻ - Concentração permitida de NO₃⁻ na água subterrânea

CO - Carbono orgânico

CRH - Curva de retenção hídrica do solo

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

DA - Doses de adubação

DAE – Dias após da emergência

DAS – Dias após da semeadura

DMS - Diferenças mínimas significativas do teste LSD

Ds - Drenagem superficial

Ds - Drenagem superficial

Dss – Drenagem sub-superficial (*seepage*)

e - Base do logaritmo natural

EAbN - Eficiência de absorção do nitrogênio

EAN - Eficiência agronômica do nitrogênio

EAp – Eficiência de aplicação em potencial

EEUU – Estados Unidos

EFa - Eficiência de aplicação da irrigação

EfisGN - Eficiência fisiológica do nitrogênio de grãos

EfisTN -Eficiência fisiológica do nitrogênio total

Eh - Potencial redox do solo

EIN - Eficiência interna do nitrogênio

ESALQ - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Esp - Profundidade efetiva das raízes

ETa - Eficiência total da água

ETo - Evapotranspiração de referência

ETr - Evapotranspiração real da cultura

EUa - Eficiência de uso da água

EUNG - Eficiência de uso do nitrogênio de grãos

EUNT - Eficiência de uso do nitrogênio total

Ev – evaporação da água no solo

F – Lâmina infiltrada acumulada

$f(t)$ - Velocidade de infiltração

FAO – Food and Agriculture Organization

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization Statistic

FCA-UNL - Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral

FE - Fertilidade das espiguetas

Fs – Lâmina infiltrada no tempo de empoçamento

GAML - Modelo de infiltração de Green e Ampt modificado por Mein e Larson

GCRPS - Produção de arroz com cobertura de solo

GD - Graus dias

G_{Reg} - Produtividade do arroz em casca regional

h - Lâmina de água variável, armazenada na superfície do solo nos manejos com inundação

I – Intensidade de precipitação

i – Níveis da parcela principal

IAF - Índice de Área Foliar

IC – Índice de colheita

I_c - Inundação contínua

ICN - Índice de colheita do nitrogênio

I_eS - Inundação e secagem

I_n – Inundação intermitente

IP – Início do perfilhamento

IRRI – International Rice Research Irrigation, Los Baños, Filipinas

ISO – International standard organization

j – Níveis das sub-parcelas

k - Número de blocos

K_c - Coeficiente único de cultivo

k_e - Parâmetro de ajuste equação de área foliar lâminas

K_h - Condutividade hidráulica do solo

$K_h(\theta)$ - Condutividade hidráulica não saturada do solo

$K_{h1,5}$ - Condutividade hidráulica a tensão de 1,5 cm

K_{h3} - Condutividade hidráulica a tensão de 3 cm
 K_{hs} - Condutividade hidráulica saturada do solo
 K_m - Taxa de mineralização da matéria orgânica
 L - Largura de cada lâmina verde
 I - Parâmetro de conectividade de poros
 $Leit_f$ – Leitura final do hidrômetro
 $Leit_i$ – Leitura inicial do hidrômetro
 Lib - Lâmina de irrigação bruta
 Li_L - Lâmina de irrigação líquida
 L_{mc} - Lâmina média coletada
 LSD - Teste de médias
 $M1000$ - Massa de mil grãos
 MeP – Mediados de perfilhamento
 MO – Matéria orgânica
 MOA - Momento ótimo de aplicação
 MP - Máximo perfilhamento
 Msg_{fal} - Massa seca dos grãos férteis da alíquota
 M_{spal} - Massa seca da palha da alíquota
 $Mugres$ - Massa úmida dos grãos do resto da amostra
 $Mupres$ - Massa úmida da palha do resto da amostra
 N – Nitrogênio
 n, m - Parâmetros de ajuste da equação de Genuchten
 $NEch$ - Número de espiguetas cheias por panícula
 NEt - Número de espiguetas totais por panícula
 NEv - Número de espiguetas vazias por panícula,
 N_{mint} - Nitrogênio orgânico total que é mineralizado desde o período de semeadura até a maturidade fisiológica
 N_{nat} - Nitrogênio nativo
 NO_{3S} - conteúdo de $N-NO_3^-$ na camada superficial no momento da semeadura
 $N^{\circ}col_m m^{-2}$ – Número de colmos por metro quadrado
 $N^{\circ}Pan m^{-2}$ – Número de panículas por metro quadrado
 N_t - Nitrogênio orgânico total
 p – Probabilidade

PA – Perfilhamento ativo

Pa - Produtividade da água

PAAP – Produção de arroz anual em Santa Fe

Paz - Produtividade da água azul

Pe – Precipitação efetiva

Per_{az} - Volumes de água azul percolados na região com origem em PerIr

PerIr - Percolação profunda com origem na irrigação

PerP - Percolação profunda com origem nas PP

PerT - Volumes de água total percolados na região com origem em PerIr e PerP

Per_v - Volumes de água verde percolados na região com origem em PerP

PerVaz - Conteúdo de água virtual percolada por unidade de arroz casca produzido com origem na irrigação

PerVt - Conteúdo de água virtual total percolada por unidade de arroz casca produzido com origem na irrigação e PP

PerVv - Conteúdo de água virtual percolada por unidade de arroz casca produzido com origem na PP

PG – Produtividade do arroz em casca na colheita com umidade comercial (14%), equivalente a arroz paddy

PH - Pegada hídrica

PHc - Pegada hídrica da produção de arroz em casca da cultura

PHaz - Pegada hídrica da produção de arroz em casca com origem na água azul

PHcz - Pegada hídrica da produção de arroz em casca com origem na água cinza

PHv – Pegada hídrica da produção de arroz em casca com origem na água verde

PHS – Pegada hídrica da produção de arroz em Santa Fe

PHSaz - Pegada hídrica da produção de arroz em Santa Fe com origem na água azul

PHScz – Pegada hídrica da produção de arroz em Santa Fe com origem na água cinza

PHSv - Pegada hídrica da produção de arroz em Santa Fe com origem na água verde

PI - Pluviometria dos aspersores

PlaNa – Planossolo nátrico

Pot - Porosidade total

PP - Precipitação pluviométrica total

Pp – Parcela principal

PST - Percentagem de sódio trocável

q - Densidade do fluxo

Q - Vazão dos aspersores

QNO_3^- - Quantidade de NO_3^- que necessita ser diluído

RAN - Recuperação aparente do nitrogênio

RegAb – Regossolo abrupto

RG - Radiação global

RIN – Requerimento interno do nitrogênio

RP - Resistência à penetração do solo

RS – Estado de Rio Grande do Sul, Brasil

SAMLA - Sistema de apoio metodológico a laboratórios de análise de solos, águas, vegetais e enmendas orgânicas

SD - Sinal digital dos tensiômetros

S_{faliq} – Superfície de lâminas verdes da alíquota

SIR - Sistema de intensificação em arroz

ST - Somas térmicas

SupColheitada - Superfície colheitada com arroz em Santa Fe, Argentina

t – Tempo após do empoçamento

T – Transpiração da cultura de arroz

T0 - Testemunha, apenas com nitrogênio na semeadura

T1- Tratamento com doses de adubação de 27% do requerimento total de nitrogênio

T2 - Tratamento com doses de adubação de 47% do requerimento total de nitrogênio

Tb - Temperatura base para obtenção das somas térmicas

Tç – Agro-ecossistema Terraço

tc - Duração do ciclo em dias

TCBAT – Taxa de crescimento da biomassa aérea total

TCBB+C - Taxa de crescimento da biomassa de bainha + caule

TCBFS - Taxa de crescimento da biomassa de folha senescente

TCBFV - Taxa de crescimento da biomassa de folha verde

TCBP - Taxa de crescimento da biomassa de panícula

TDR – Time domain reflectometry

Tm – Temperatura média do ar

Tmax - Temperatura máxima do ar

Tmin - Temperatura mínima do ar

Tms - Temperatura média do solo na camada superficial

Tp – Tempo teórico do início do empoçamento

Ug - Umidade dos grãos do resto da amostra

UNFPA - United Nations Population Fund

Up - Umidade da palha do resto da amostra

UR - Umidade relativa do ar

USDA SCS – United States Department of Agriculture Soil Conservation Service

VIB - Taxa de infiltração básica

VTD - Volume total de água disponível pela cultura de arroz em Santa Fe

Vv - Velocidade de vento

Vz – Agro-ecossistema Várzea

z – Profundidade efetivas das raízes do arroz

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é essencial para fornecer alimentos à população mundial, estimada em 7.200 milhões (2013), com previsão de aumentar 1.000 milhões em 2025 até alcançar 9.600 milhões em 2050 (UNFPA, 2013). O maior crescimento da população ocorre em países em desenvolvimento, onde os cereais são a base da alimentação, sendo o arroz um dos principais produzidos (FAOSTAT, 2013).

Para esta cultura é utilizada, no mundo, aproximadamente 158 milhões de hectares (FAOSTAT, 2013), 79 milhões irrigados e o restante em sequeiro, com produtividades médias de 5 Mg ha⁻¹ em áreas com irrigação e apenas 1,5 Mg ha⁻¹ em áreas de sequeiro (BOUMAN, LAMPAYAM e TUONG, 2007). A estimativa da produção mundial de arroz em casca em 2011 foi de 718 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2013), sendo o continente Asiático o maior produtor a nível mundial, com 90,70%, seguido de América com 5,44%, África com 3,14%, Europa com 0,52% e Oceania com apenas 0,20% (FAO, 2013). A produção de arroz dos dez principais países produtores (Tabela 1) representa 86% da produção mundial.

Tabela 1 - Posição dos principais países produtores de arroz ano 2012

Posição	País	Produção (Mg)	Posição	País	Produção (Mg)
1	China	201.000.900	6	Tailândia	34.588.355
2	Índia	157.900.000	7	Mianmar	29.009.894
3	Indonésia	65.740.946	8	Filipinas	16.684.062
4	Bangladesh	50.627.000	9	Brasil	13.476.994
5	Vietnã	42.398.345	10	Paquistão	9.194.000

Fonte: FAOSTAT, FAO Direção de Estatística 2013

Argentina produziu 1,397 milhões de toneladas de arroz em casca na safra 2012-13, com 222.695 ha colhidas (ACPA, 2013) e produtividade média de 6,3 Mg ha⁻¹. As províncias produtoras encontram-se na região Litoral, sendo a província de Corrientes e Entre Ríos as principais, seguido da província de Santa Fe (Figura 1). A distribuição da superfície colhida em Argentina, na safra 2012-13 (Figura 2) indica que Santa Fe participa com 19% do total nacional, no entanto, considerando a produção de arroz em casca nacional (Figura 3) a participação descende a 14%, demonstrando problemas na produtividade em relação às demais províncias produtoras.

Figura 1 - Províncias produtoras de arroz na Argentina

Figura 2 - Superfície de arroz colhida total de Argentina e de cada província orizícola
(Fonte: ACPA, 2013)

Figura 3 - Produção de arroz em casca total de Argentina e de cada província orizícola (Fonte: ACPA, 2013)

Para aumentar a produtividade da cultura de arroz irrigado é usada água "doce" ou também chamada de água azul (FALKENMARK, 1995) com eficiências de irrigação variáveis (20 a 60%), mas com possibilidades de atingir até 80% com uma gestão da água adequada. Assim, os dois principais recursos (solo e água) são renováveis e limitados, e apresentam risco de contaminação. Porém, como incrementar a produção de alimentos, incorporando terras ou incorporando irrigação? Ao mesmo tempo em que o primeiro enfrenta limitações ambientais (preservação) ou populacionais (uso do solo em áreas urbanas), a água azul também enfrenta forte concorrência com o consumo humano e com a produtividade econômica da água, que tem prioridades sobre a irrigação. A isto se agrega a distribuição desigual entre os recursos naturais e a população mundial que consome alimentos e outros produtos.

Em Santa Fe a produção de arroz é promissora, com acréscimo de até 100% da área cultivada na última década (MARANO et al., 2013). Para isso conjugou-se a disponibilidade de terra, e fundamentalmente a de água, cuja qualidade e quantidade são excelentes e de fácil extração a partir de braços do rio Paraná. Porém, as produtividades de arroz em casca em Santa Fe estão estancadas em torno a 6 Mg ha⁻¹ nos últimos anos, com tendência a declinar (Figura 4), apesar de se utilizar tecnologias (cultivares, adubação, maquinaria, entre outras) para alta produtividade. Boa parte dos solos desta Região que foram incorporados à produção de arroz tem limitantes, tanto físicas quanto químicas (PILATTI et al., 2003), sendo sua vegetação nativa comunidades herbáceas de tipo hidrófitas e halófilas

(HILGERT et al., 2003). A matéria orgânica (MO) nestes solos, quando prístinos, é elevada (PILATTI et al., 2003). Porém, ao incorporar-os à orizicultura contínua, sem rotação, diminui progressivamente e pode começar um processo de degradação.

Nesta região a eficiência da irrigação é muito baixa, entre 25 e 40% (MARANO et al., 2013) devido a diversos problemas operacionais como a falta de sistematização do solo, inexistência de automatização de estruturas hidráulicas e manejo artesanal da irrigação. Outra razão da perda da água deve-se ao uso do método tradicional de inundação contínua (Ic), onde as precipitações que ocorrem durante o ciclo da cultura não são aproveitadas. Neste período, o arroz dispõe de 2.500 mm, onde as precipitações pluviais (PP) representam entre 400 e 600 mm e o restante é aportado pela irrigação (MARANO et al., 2013). A maior parte da PP drena devido à impossibilidade de sua utilização. Isto traz como consequência maior consumo de energia, devido à necessidade de bombeamento dos excedentes pluviais, e também a possibilidade de arrastar resíduos químicos (WEBER et al., 2003).

Figura 4 - Produtividade média de arroz em casca safras 2005-05 até 2012-13 em Santa Fe e Argentina
(Fonte: ACPA, 2013)

Para o aumento da eficiência de irrigação, numerosos autores pesquisaram manejos alternativos à inundação contínua: por exemplo, inundação intermitente (In, STOPP et al., 2002; BELDER et al., 2004; BOUMAN et al., 2006; PENG et al., 2006; MEZZOMO, 2009) e também outros métodos de irrigação, como aspersão (AS, STONE et al., 1994; TOESCHER et al., 1997; CRUSCIOL et al., 2000; ARF et al., 2001) ou gotejamento (BEECHER et al., 2006).

Por outro lado, foram feitas diferentes pesquisas sob avaliações do impacto do nitrogênio (N) na produtividade da cultura de arroz irrigado, tanto nas doses (ZHANG et al., 2008, ARTACHO et al., 2009) quanto ao momento de aplicação (HAEFELE et al., 2003; WANG et al., 2011). Assim, os manejos da água e do N são as duas práticas mais importantes para aumentar a produtividade do arroz (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000, FAGERIA, 2007).

O arroz é a principal cultura irrigada em Santa Fe (MARANO et al., 2013), porém, são insuficientes as pesquisas em manejos ou métodos de irrigação alternativos à Ic, além da resposta ao N (doses e momentos de aplicação), que permitam incrementar a produtividade da água e da cultura, contribuindo à sustentabilidade do ecossistema.

Hipóteses

a) O arroz tipo índico com variedades adaptadas a condições anaeróbicas (ANA), cultivado em áreas de várzeas cujos solos apresentam condições contrastantes em textura, compactação, sodicidade, infiltração, percolação e drenagem, degradados pela agricultura continua e que recebe dotação hídrica tanto da irrigação quanto da PP de verão, pode ser irrigado com manejos alternativos da água que permitam diminuir as lâminas aplicadas e possibilitem maior aproveitamento das chuvas, incrementando as eficiências de irrigação e de uso da água, e sem diminuição do potencial de produtividade da cultura.

b) Em solos de textura franco-argilo-arenosa, baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e MO, semeados com cultivares de arroz de alta produtividade, com uréia como fonte de adubação e manejos da água que alternam solo com e sem saturação, a aplicação parcelada do N em cultivares de alta produtividade, desde semeadura até o início do período reprodutivo, aumenta a quantidade de grãos por unidade de superfície e permite maior recuperação aparente do N aplicado na adubação.

c) Em solos de textura franco-siltosa, com alta condutividade hidráulica, próximos a rios de descarrega regional, com baixa CTC e MO, cultivares de alta produtividade tem resposta às doses contrastantes de N.

Objetivos

Geral

Contribuir à sustentabilidade do sistema produtivo do arroz irrigado com água superficial em áreas de várzea, reduzindo as quantidades aplicadas tanto do volume de água quanto do N, sem diminuir seu potencial de produtividade.

Específicos

- a) Caracterizar agro-ecossistemas contrastantes em ordem a identificar restrições à produção de arroz, de origem natural e antrópico, em Santa Fe, Argentina;
- b) Avaliar os manejos AS e In como alternativos para arroz irrigado em agro ecossistemas contrastantes;
- c) Quantificar os componentes do balanço hídrico da cultura de arroz para diferentes manejos da água, solo e condições hidrológicas;
- d) Avaliar o desenvolvimento do arroz em diferentes condições hídricas e nutricionais;
- e) Avaliar doses e momento de aplicação de adubos nitrogenados;
- f) Validar indicadores de eficiência de N e da adubação nitrogenada;
- g) Aumentar as eficiências de irrigação e de uso da água, diminuindo a captação de água superficial e maximizando o aproveitamento das precipitações;
- h) Determinar a pegada hídrica de arroz em Santa Fe;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos para uso do arroz

Uma característica do sistema tradicional de cultivo de arroz é a condição de inundação do solo, na qual o oxigênio rapidamente diminui nas 6 a 8 horas seguintes, devido à atividade dos micro-organismos e a que a taxa de difusão do O_2 é aproximadamente 10.000 vezes menor com poros cheios de água que com ar (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000). Nas seguintes semanas ao início da inundação, quatro zonas são desenvolvidas no sistema água-solo-raízes, no qual se desenvolvem processos que contribuem a fornecer o N e outros nutrientes (REDDY, 1982): a) água armazenada acima do solo (manejo 1c) de altura variável, com maior concentração de O_2 devido à menor atividade de micro-organismos, ao ingresso de água fresca e ao aporte de O_2 pela fotossíntese das algas, que a sua vez contribuem à fixação biológica do N_2 atmosférico; b) um estrato na interfase água-solo, oxidado, com uma espessura variável entre 6 a 12 mm, dependendo do teor da MO do solo (REDDY, 1982); c) uma capa reduzida imediatamente abaixo da oxidada, entre 0,02 a 0,2 m e d) um estrato oxidado ao redor das raízes na zona reduzida. Isto é devido às raízes utilizam O_2 a través dos aerênquimas, que são órgãos com ar localizados nas folhas e colmos que o transportam até as raízes. Parte deste O_2 é utilizada na respiração e parte é difundida através das raízes à rizosfera, que assim fica também oxigenada (YOSHIDA, 1981).

O Potencial redox (Eh) é um indicador das condições de redução do solo e diminui nas seguintes 3 a 5 semanas, até alcançar um equilíbrio em função do teor da MO lábil, e as respectivas concentrações de íons receptores de elétrons na decomposição microbiana, como O_2 , NO_3-N , Mg, Fe e SO_4^{2-} (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000). O estrato aeróbico suporta a microflora aeróbica, sendo o sítio no qual ocorrem os processos de transformação do N que requerem oxigênio, e o contrário ocorre no estrato anaeróbico (REDDY, 1982).

2.2 Características da planta e produtividade

São duas as espécies do arroz cultivado, *Oryza sativa* e *Oryza glaberrima*, sendo a primeira a mais difundida no mundo. Esta se divide em três grupos:

japónica, índica e javânica (TAKAHASHI, 1984 referido por FAGERIA, 2007). O grupo japónica predomina em climas temperados e seus grãos são conhecidos como largo, no entanto que o índico é mais próprio de climas tropicais ou subtropicais, também chamados grãos longos finos ou agulhinha. O grupo javânica é uma adaptação do japónica para climas tropicais.

Dependendo das condições hidrológicas (deficitária, excedente ou ótima), drenagem do solo (pobre ou adequada), temperatura do ar (ótima ou baixa), solos (normais ou com problemas), e declividade (plano ou declivoso), o arroz pode ser classificado, segundo Bouman, Lampayan e Tuong (2007), em: i) arroz irrigado em áreas de várzeas (lowland, com 79 milhões de hectares), ii) arroz de sequeiro em áreas de várzeas (rainfed, com 54 milhões de hectares), iii) arroz propenso à inundação (deep water, com 11 milhões de hectares) e iv) arroz de sequeiro em terras altas (upland, com 14 milhões de hectares). O primeiro também é chamado de paddy rice.

No sistema rainfed, predominante na Ásia, a precipitação é a única fonte de água para o campo e não há certeza da duração da água acumulada na superfície, dependendo da irregularidade das PP. Quanto ao deep water, os campos sofrem periodicamente o excesso da água e podem ser alagados com lâminas maiores que 0,25 m por 10 dias ou mais (BOUMAN, LAMPAYAN e TUONG, 2007).

Os sistemas lowland e upland são os mais comuns na América do Sul. O arroz em áreas de várzea com irrigação por inundação continua (Ic), também é denominado anaeróbico (ANA) porque é desenvolvido em condições de solo inundado. Nesse manejo, a água é acumulada em superfície pelo menos 80% da duração do ciclo. Na Ásia é comum o transplante de mudas em solo enlameado (puddling) preparado a partir da submersão e passada de grade com boi (puddling). Essa técnica é feita para facilitar o transplante, controle de plantas daninhas e reduzir a infiltração (BOUMAN, LAMPAYAN e TUONG, 2007). Além disso, nas regiões com monções é desenvolvido o duplo cultivo de arroz, um na estação chuvosa (monção, com menores produtividades) e outro na seca, com maiores produtividades e com irrigação (YOSHIDA, 1981, BOUMAN et al., 2005). Outra característica das áreas de várzea é que o lençol freático permanece próximo à superfície de solo, de modo que as perdas por percolação influem diretamente sob o nível.

Em algumas regiões da Ásia e Brasil também é cultivado com resultados promissores o arroz de terras altas, ou denominado aeróbico (AE), que necessita solos bem drenados, sem acumulação de água em superfície e lençol freático profundo (STONE et al., 1994). No Brasil o AE tem aproximadamente 2 milhões de hectares cultivadas cada ano na região dos Cerrados, no centro-oeste do país. Apesar de na atualidade ter a metade da área que foi cultivada na década dos '80, este sistema tem potencialidade de ser expandido no caso de cenários de alta demanda de alimentos (PINHEIRO et al., 2006).

Os cultivares AE tem menores produtividades em relação aos cultivares ANA. Embora sejam mais tolerantes a estresse hídrico, apresentam resposta à irrigação suplementar se o solo mantém-se saturado (PENG et al., 2006).

O ciclo da cultura pode se dividir, segundo Yoshida (1981) em estado vegetativo (desde germinação até iniciação da panícula), reprodutivo (desde iniciação da panícula até floração) e enchimento dos grãos (desde floração até maturação completa). O conhecimento do padrão de desenvolvimento ou fenologia é fundamental para realizar práticas de manejo que permitam lograr altas produtividades (QUINTERO, 2009), especialmente quando a cultura apresenta condições limitantes a seu crescimento potencial devido a fatores tais como solo, água, ambiente, nutrição o pragas.

As variedades ANA utilizadas na América do Sul têm origem nas índicas semi-anãs desenvolvidas na década de 1960 pelo IRRI, insensíveis ao fotoperíodo, de folhas eretas, alto perfilhamento, altura média de 1 m, colmo rígido e com resposta à aplicação de N (YOSHIDA, 1981). É importante destacar que, em semeaduras como solo seco, a capacidade de produzir perfilhos, em condições adequadas de emergência de plântulas, não é tão importante, devido à produtividade depende mais do colmo principal que dos perfilhos (YOSHIDA, 1981).

A produtividade do arroz pode ser calculada a partir da quantidade de biomassa do grão (incluído casca), limpo e seco em estufa, em relação a uma unidade de superfície, simbolizada como BG. As unidades de massa (SI) podem ser quilogramas (kg), megagramas (Mg) ou toneladas métricas (t) e as de superfície, hectare (ha). Geralmente, para comparar diferentes níveis de produtividades se ajusta BG a uma porcentagem de umidade (13 ou 14%), simbolizando como PG. Alguns autores analisam as diferenças entre a produtividade potencial e o potencial de produtividade, sendo o primeiro conceito relacionado à máxima produtividade

alcançada por uma cultura com certas condições ambientais e sem restrições, obtida geralmente mediante modelos de simulação matemáticos que apresentam diferentes suposições agronômicas (PILATTI et al., 2011). O segundo conceito refere à produtividade de um cultivar desenvolvido e adaptado num meio ambiente específico, sem restrições de solo, água e nutrientes e controle efetivo de plantas daninhas, doenças, e outros possíveis estresses (FAGERIA, 2007; QUINTERO, 2009). No entanto, Yoshida (1981) indica que o potencial de produtividade é determinado principalmente antes da floração, embora a produtividade final, baseada na quantidade de amido que enche as espiguetas, ocorre fundamentalmente após da floração.

Em áreas experimentais de pesquisa, com condições controladas, é possível alcançar potencial de produtividade, resultando profusão de bibliografia no caso de arroz. Podem referir-se os trabalhos feitos no IRRI (Los Baños, Filipinas) com mínimos de 5 Mg ha⁻¹ e máximos de 8 Mg ha⁻¹ para ANA, e de 3 Mg ha⁻¹ até 5,6 Mg ha⁻¹ para AE (BOUMAN et al., 2005) e também médias de 7,78 Mg ha⁻¹ e 3,77 Mg ha⁻¹ para ANA e AE respectivamente (PENG et al., 2006).

Na China, na região subtropical de Yunan e no Japão, na região temperada de Kioto, foram obtidos valores de PG desde 5,5 Mg ha⁻¹ até 10,5 Mg ha⁻¹ para cultivares ANA (KATSURA et al., 2008). No Brasil, na região Sul (Santa Maria, RS), foram obtidas médias de PG para cultivares ANA entre 7,1 e 8,4 Mg ha⁻¹ (WEBER et al., 2003, MACHADO et al., 2006). No Uruguai, a Estación Experimental del Norte del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA Tacuarembó, 2005) determinaram valores de PG de 10,4 Mg ha⁻¹.

Na Argentina, para cultivares ANA os valores de PG determinados em diferentes pesquisas foram entre 6,4 Mg ha⁻¹ até 10,7 Mg ha⁻¹ na província de Entre Ríos (QUINTERO, 2009) e entre 4,9 Mg ha⁻¹ até 7,2 Mg ha⁻¹ na província de Corrientes (BENINTENDE et al., 2011). Na província de Santa Fe, são poucas as pesquisas desenvolvidas em arroz, salientando o trabalho de Muzio e Marano (2011) que referem valores médios de PG de 9,3 Mg ha⁻¹ para variedades ANA em sistemas lc.

Os agricultores não conseguem alcançar esses valores de PG nas condições de campo, resultando esta questão de vital importância. Assim, as diferenças entre dados obtidos em experimento e os resultados no campo podem alcançar entre 40 a 50% (DOBERMAN, 2000; QUINTERO, 2009).

2.3 Necessidades de água e de irrigação

O arroz é uma cultura fortemente demandante de água, sendo que esta é utilizada não só para os requerimentos fisiológicos (evapotranspiração) mas também para o manejo (preparo do solo para transplante ou germinação, saturação e compactação do solo, armazenagem na superfície de uma lâmina de água, controle de plantas daninhas, ação dos herbicidas e adubos, controle de temperaturas máximas e mínimas). Porém, ao manter-se em quase todo seu ciclo inundado, se incrementam as perdas por drenagem superficial e percolação profunda, mais ainda se a textura do solo é franca ou franca-arenosa.

Em sistemas de irrigação com inundação, que armazenam na superfície do solo uma lâmina (h) continua (lc) e cultivados com variedades ANA na Ásia, com solos de textura argilosa ($> 45\%$ argila), a preparação do terreno consiste em aplicar água, arar e amassar até formar lodo numa camada entre 10 a 15 cm, que assim fica saturada e quase impermeável, sobre a qual são transplantadas as mudas de arroz (BOUMAN e TUONG, 2001). A quantidade de água média requerida para isto alcança 150 a 200 mm, dependendo as condições de umidade inicial do solo (BOUMAN, LAMPAYAN e TUONG, 2007), que aumenta até 430 mm quando se armazena uma h média de 10 cm (PENG et al., 2006), ainda que possa chegar a 650 ou 900 mm em alguns sítios (BOUMAN e TUONG, 2001). Na mesma região, mas com cultivares AE, condição que apenas necessita água para formar lodo no transplante de mudas, se requerem de 80 a 130 mm (BOUMAN et al., 2005). Bouman et al. (2007), num trabalho de recopilação de dados de lâminas totais disponíveis (irrigação + precipitações) para sistema lc com variedades ANA na China e nas Filipinas, referem valores tão baixos como 575 mm até 3.504 mm.

Na América do Sul (Argentina, Brasil, Uruguai e Paraguai) é comum só um ciclo anual (verão) com semeadura em seco, tanto convencional quanto plantio direto (FAGERIA, 2007; QUINTERO, 2009). O preparo convencional consiste em passagem de grade de discos para uniformar o terreno (junho-julho), segundo as condições de umidade de solo e as marcas deixadas na colheita, e finalmente em agosto passagem de grade de dentes para preparar a cama de semeadura. Os trabalhos incluem controle de ervas daninhas no início da primavera. No caso de

plantio direito, é fundamental o manejo da palha do ciclo anterior, devido à necessidade de colocar a semente a profundidades não maiores de 2,5 cm no caso de variedades semi-anãs, para garantir adequada uniformidade de emergência de plântulas (LINScombe et al., 2009). Para isso o melhor seria esparramar a palha na colheita e após o uso de rolo faca (semelhante ao utilizado em RS, Brasil) para comprimir e deixar a palha em contato direto com o solo úmido. Após à emergência e antes do início do perfilhamento começa a inundação, embora seja necessário saturar a camada superficial do solo, sendo a lâmina requerida variável segundo o conteúdo de água e a textura do solo e a profundidade efetiva das raízes.

Tradicionalmente, h era requerida para controle de plantas daninhas que concorriam com o arroz no uso de água e nutrientes, embora o desenvolvimento de herbicidas e variedades resistentes permitiu diminuir a altura de h . Pesquisas feitas em casa de vegetação por Anbumozhi et al. (1998) com alturas de 0, 3, 6, 9, 12, 15 e 18 cm resultaram em 9 cm o valor de h que apresenta a maior PG e máxima eficiência de uso da água (EUa). Outra função reconhecida para definir a altura de h é o efeito termorregulador da água.

A Figura 5 representa um esquema de arroz de terras baixas com h após o começo da irrigação, quando a camada de solo com as raízes já foi saturada, acumulou-se h na superfície e a percolação atingiu o lençol freático.

Por outro lado, o arroz é sensível às baixas temperaturas em diferentes estádios fenológicos, especialmente variedades japônicas. O estágio de microsporogênese ou emborrachamento é o mais sensível a baixas temperaturas do ar, devido haver interferência na divisão celular dos grãos de pólen (FAGERIA, 2007).

A literatura cita diferentes temperaturas críticas para que isso aconteça. Yoshida (1981) indica valores de 20°C, embora resultados de pesquisas em cultivares da região Sul do Brasil indicaram que a antese é o estágio mais sensível a baixas temperaturas (17°C) durante um período de 7 dias consecutivos (PEREIRA da CRUZ et al., 2006). Essas temperaturas acontecem em regiões temperadas do RS, Brasil e no Litoral da Argentina no mês de fevereiro, sendo recomendado acrescentar o valor de h em torno a 20 cm e assim atingir, pela noite, diferenças de até 6 °C a mais que a temperatura do ar (SOSBAI, 2010). Em Yanco, Austrália, também a altura de h alcança 20 cm no estágio de microsporogênese para diminuir os efeitos das baixas temperaturas (HUMPHEYS et al., 2006).

Figura 5 - Esquema conceitual de arroz de terras baixas com inundação contínua (Ic) após do início da irrigação, com lâmina permanente (h) em superfície e saturação do solo até o lençol freático

Em Santa Maria (RS), foi medida em parcelas experimentais a lâmina total de irrigação para cultivares ANA, sistema Ic, com diferentes métodos de preparo do solo: convencional, cultivo mínimo, pré-germinado e transplante de muda. Os valores resultaram entre 540 a 640 mm (MACHADO et al., 2006), incluindo nestes a quantidade de água necessária para o preparo do solo dos métodos pré-germinado e transplante de muda, onde é necessário formar lodo. Nesta pesquisa não foi separada a proporção de água que aportaram as precipitações, além de supor que não houve percolação profunda, drenagem superficial e tampouco fluxo lateral.

Nos EEUU, na região de Mississipi e Arkansas, pesquisas feitas por Smith et al. (2007) referem valores médios de lâminas de irrigação totais de 1.034 mm para arroz com sistema Ic. No Uruguai foram medidas as lâminas de irrigação totais durante três safras, com sistema Ic e variedades ANA, resultando ente 840 mm até 1.340 mm (ROEL, 1999). Também no Uruguai, INIA Tacuarembó (2005) determinou dados de evapotranspiração e lâmina de irrigação total para sistemas Ic com variedades ANA, resultando em 630 mm e 1.073 mm respectivamente.

Resumindo, as quantidades totais de água aplicada na irrigação da cultura de arroz podem ser duas ou três vezes maiores que as necessárias para satisfazer a

evapotranspiração, devido ao manejo realizado (BOUMAN et al., 2005; MUZIO e MARANO, 2011).

Os métodos com h (continua ou intermitente) aumentam as perdas de água. Isto acontece devido à magnitude da condutividade hidráulica do solo (K_h), que no caso de estar saturado pode alcançar valores 100 vezes maiores que em condições não saturadas (DEWANDEL et al., 2008). Outro componente que gera perdas por movimento de água é o gradiente hidráulico, favorecendo o movimento tanto vertical (percolação profunda) como horizontal (seepage). Esta última situação é favorecida no caso de manter-se a lâmina h de maneira contínua.

Quando acontecem precipitações significativas, o sistema I_c não permite sua retenção, resultando num incremento do escoamento superficial. Devido a isso, a prática de manter a cultura de arroz com inundação continua é questionada por alguns pesquisadores (ANBUMOZHI et al. 1998; SMITH et al., 2007). A drenagem superficial (D_s) pode ser necessária em condições de I_c depois de chuvas de magnitudes significativas. Essa variável pode ser determinada utilizando tubos acima do nível máximo de irrigação, conectados a um dispositivo de medição de vazão (MACHADO et al., 2006). Isto requer uma precisa avaliação da quantidade de água drenada, com sistemas automáticos ou que possibilitem o armazenamento de uma fração da lâmina excedente. Outro modo de avaliar D_s é conectando todas as saídas dos tratamentos a uma única tubulação e medir a vazão no final, com dispositivos de medição similar ao desenvolvido por Samani et al. (1991) e equipados com sensores de medições do nível de água automáticos (BEECHER et al., 2006). Os valores de D_s resultarão da divisão da quantidade total de cada evento pelo número de parcelas dos tratamentos.

2.4 Manejo da irrigação

Para aumentar a eficiência de aplicação da irrigação (E_{Fa}), foram propostos métodos alternativos a I_c , ainda mantendo a irrigação por inundação. Como exemplos podem se mencionar quatro:

a) sistema de intensificação em arroz (SIR por seu acrônimo em inglês), iniciado em Madagascar e estendido a muitas regiões de Ásia. Consiste em transplantar mudas de arroz mais jovens, manter o solo sem submergir durante o

estádio vegetativo e, depois da diferenciação da panícula, começar a inundação com uma lâmina muito pequena, de 2 a 3 cm (STOOP et al., 2002).

b) inundação e secagem (leS, ou wetting and drying), aplicado em regiões de África e Ásia. Consiste em inundar no transplante com uma lâmina aproximada de 2-3 cm durante uma semana para estabilizar as mudas e, no resto do ciclo, submergir com lâminas de 5 cm e após deixar secar o solo durante 3 a 5 dias ou até atingir tensões de 10-30 kPa na profundidade de 0,15 m, e novamente alagar até a lâmina anterior (BELDER et al., 2004; BOUMAN et al., 2005; BOUMAN, LAMPAYAN e TUONG, 2007).

c) produção de arroz com cobertura de solo (GCRPS por seu acrônimo em inglês), utilizado em variedades ANA que são cultivadas sem lâmina de água na superfície e deixando infiltrar a água no solo até 80 a 90% da capacidade de armazenamento. Para prevenir a evaporação do solo coloca-se palha ou filme plástico após do transplante (LIN et al., 2002).

d) intermitente (In), aplicado no Sul de Brasil, Uruguai e Argentina. Consiste em submergir no início do perfilhamento (estado fenológico V4-V5) com uma lâmina de aproximadamente 10 cm e, após de cada inundação, permitir sua diminuição até o nível do solo, começando novamente a irrigação e voltando à altura h original, mas mantendo o solo em continua saturação (MEZZOMO, 2009). A principal diferença entre os métodos leS e In é a quantidade de dias em que o solo fica não saturado, resultando entre 1 a 10 para leS e zero para In.

Para avaliar a resposta ao método leS, Bouman et al. (2005) realizaram pesquisas durante três anos no IRRI, com variedades ANA e AE. Objetivaram determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c), lâminas de irrigação total, perdas por percolação profunda, drenagem superficial e fluxo lateral. Cada ano abrangeu uma estação seca e outra chuvosa, própria das monções. Para Ic, a quantidade total de água utilizada (incluindo preparo do solo) foi entre 1.300 a 1.900 mm, resultando uma ET_c –média para as estações secas e chuvosas- de 511 mm. Em tanto para leS foi utilizada menos água, entre 700 e 1.000 mm respectivamente, resultando uma ET_c de 440 mm, o que representa uma redução de 14%. Do total da ET_c, 30% corresponderam à evaporação e 70% a transpiração. Em leS, a evaporação tem maior variabilidade que no Ic, porque o solo seca e satura alternadamente. As perdas (drenagem superficial, sub-superficial e percolação profunda) foram muito variáveis em função da época do ano. Na estação seca as perdas devem-se

principalmente à irrigação que, em média para leS, foram 295 mm menor que em lc. Na estação chuvosa as perdas foram 255 mm menor em leS em relação a lc.

Dobermann (2004) critica o método leS, pois há diminuição da atividade biológica dos micro-organismos que fixam nitrogênio orgânico a partir do N₂, devido ao solo ser submetido a períodos alternados de inundação-aeração. Esse autor sugere que no caso de solos férteis e com sistemas de duas a três safras de arroz por ano, manter o solo inundado permite obter altas produtividades ao longo do tempo.

Na região de Mississipi e Arkansas, Smith et al. (2007) avaliaram diferentes *layout* com sistemas lc: a) taipas contornadas segundo a curva de nível e aplicações em cadeia (contoured-levee + levee-gate), b) taipas contornadas e entradas de água múltiplos (straight-levee + multiple-inlet) e c) declividade zero (zero-grade). Os autores encontraram que em a) as lâminas de irrigação variam entre 789 a 1.034 mm; no entanto em b) foram entre 619 e 653 mm. Os melhores resultados foram em c), com lâminas de irrigação de apenas 380 a 580 mm.

O sistema In foi utilizado na região Sul de Brasil para variedades ANA com uma economia de 32% de água, devido ao aproveitamento das precipitações no período de irrigação (MEZZOMO, 2009). Neste trabalho não foi avaliada a percolação ou outras perdas decorrentes dos métodos de inundação continua ou intermitente.

O cultivar AE pode ser utilizado em condições de sequeiro, na estação chuvosa e com irrigação suplementar com métodos de aspersão, principalmente pivô central. A vantagem principal do AE é que utiliza menor quantidade de água resumida em três vias: a) não precisa de solo saturado para seu desenvolvimento e, no caso de aqueles com grande drenagem (percolação + seepage) a economia de água pode ser de até 50% (BOUMAN et al., 2007); b) preparação do solo, especialmente nas regiões onde é utilizado o método de transplante de mudas, já que no caso de AE apenas requer água para enlodar a terra e c) evaporação da água desde os tabuleiros, já que não tem uma lâmina continua de água armazenada em superfície.

No sudeste de Austrália, a utilização de bordos elevados (BE) denominados *raised bed*, em inglês, foi pioneira no final do 70 para solos impermeáveis com alto teor de argila (BEECHER et al., 2006). Estes autores indicam como vantagem da técnica o melhoramento da estrutura do solo devido à redução da compactação por

trânsito controlado e oportuno da maquinaria já que os bordos ajudam ao escoamento da água. Do mesmo modo se evitam períodos prolongados de alagamento e anaerobiose, especialmente em culturas sensíveis (HUMPHREYS et al., 2006). Foram feitas pesquisas em New South Wales (NSW), Austrália, para acrescentar a EFa considerando BE inundados com diferentes lâminas de água (5, 15 e 20 cm), irrigação por sulcos e gotejadores sub-superficiais, comparados com sistema tradicional de inundação em relevo plano (BEECHER et al., 2006). Foram utilizadas variedade ANA, com inundação inicial para conseguir adequada germinação das plantas e controle de ervas daninhas. As conclusões mais importantes deste trabalho, ainda com só uma safra, demonstram que altas produtividades de arroz podem ser obtidas com sistema BE, porém, quando os bordos são inundados após de diferenciação da panícula, já não há economia de água comparada com o sistema tradicional. O aumento da lâmina de água acumulada em superfície deve-se à necessidade de controle por frio no estágio de microsporogênese (BEECHER et al., 2006).

O método AS também é utilizado como alternativa a inundação. Pesquisas em variedades de arroz ANA comparando AS com Ic e aplicações parceladas de N foram feitas nos EEUU nos anos 1983 e 1984 (WESTCOTT e VINES, 1986), sob solos argilosos (vertissolos), com irrigação a cada dois-três dias e lâmina bruta de 38 mm por aplicação. Utilizaram tensiômetros ubicados a 0,15 m de profundidade para definir as irrigações (lâmina fixa e intervalo variável) e, no período com irrigação, a tensão da água no solo foi mantida em 30 kPa. Os resultados indicaram que o manejo AS teve a menor produtividade em ambas as safras, afetando principalmente a quantidade e esterilidade das espiguetas, no entanto nem a quantidade de panículas ou a massa dos grãos tiveram influência. A menor quantidade de espiguetas no manejo AS foi atribuído a problemas de deficiência hídrica no estágio de diferenciação da panícula, no entanto o aumento da esterilidade das espiguetas foi atribuído à doença queima-da-bainha (*Rhizoctonia solani*). Os autores não referem problemas na infiltração nem na condutividade hidráulica, apesar das características vérticas do solo, nem possível afastamento dos grãos do pólen devido às gotas dos aspersores. A incidência da doença foi atribuída ao maior tempo de molhado das lâminas ou também possível salpicadura das gotas no solo, atuando como transmissora da doença. Também determinaram interação estatisticamente significativa na produtividade entre manejos da água e a aplicação parcelada do N,

concluindo que o manejo AS foi favorecido com a aplicação parcelada do N (prévio a inundar e durante a diferenciação). Outra conclusão importante da pesquisa indica que, devido às condições saturação/não saturação do solo segundo os manejos da água, a disponibilidade de N nas formas de amônio ou nitrato é diferente e que isso também repercutiu na resposta produtiva.

No Brasil começaram pesquisas com AS nos anos `80 na região dos Cerrados, com base em Embrapa Arroz e Feijão. Essa região apresenta uma superfície aproximada de 300.000 ha com pivô central (PINHEIRO et al, 2006), utilizados para irrigar diferentes culturas, especialmente em períodos de estiagem durante a estação chuvosa. Como resultado, o arroz é importante para amortizar o investimento inicial (CRUSCIOL et al., 2000). As variedades utilizadas foram de terras altas (AE), geralmente adaptadas a resistir períodos de estresse hídrico. Se bem que algumas pesquisas utilizaram tensões de 70 kPa para começar a irrigação (CRUSCIOL et al., 2000), o mais aceitado para as condições de solo dos Cerrados são tensões menores, em torno de 25 kPa na profundidade de 0,15 m (STONE et al., 1986; STONE e SILVEIRA, 2004; PINHEIRO et al., 2006). Os incrementos de produtividade podem ser de até 177% nos anos onde o período de estiagem coincide com a floração ou enchimento de grãos (ARF et al., 2001). As principais desvantagens do pivô são os custos de investimento e de operação (rede pressurizada).

De acordo com a bibliografia consultada, para aumentar as eficiências de uso de água e de irrigação os principais métodos propostos de irrigação são In para variedades ANA e a As para variedades AE.

2.5 Pegada hídrica

O conceito de “pegada hídrica” (*water footprint*), proposto por Hoekstra e Hung (2002), representa o volume da água necessária para a produção de um determinado produto (neste caso, alimentos) ou serviço que consome a população de uma região ou país. Assim, há nações com alta população e alto consumo de produtos/alimentos, onde uma porcentagem significativa da pegada hídrica é importada, ao tempo que em outros países, como Argentina e Brasil entre outros, são notadamente exportadores de água virtual (AV), incorporado em cada tonelada

de alimento produzido, sendo ela um valor agregado ainda não quantificado adequadamente nesses países.

2.6 Nutrição mineral

As entradas principais de N ao sistema seriam os adubos minerais ou orgânicos e, em menor proporção, o N_2 atmosférico fixado pelos micro-organismos presentes na água de inundação e no solo, os aporte da água de irrigação e das PP e da poeira (DOBERMAN e FAIRHURST, 2000). As saídas devem-se às perdas por desnitrificação e volatilização de NH_3 gasoso, absorção nos órgãos das plantas colhidas e exportados fora del sistema, a lixiviação debaixo da zona de absorção das raízes (percolação ou fluxo lateral), principalmente na forma de nitratos, ainda que em sistemas lc também como amônio (WANG et al., 2011) e escoamento superficial (REDDY, 1982). Quanto à variação no armazenamento de N (ΔN) é o mais complexo e interessante porque compreende tanto à biomassa dos micro-organismos presentes no solo e na água de inundação, restos vegetais, tanto da palha e raízes do arroz como as ervas daninhas não controladas que concorrem durante o ciclo, à matéria orgânica lábil (jovem) e ao próprio solo.

A Figura 6 representa a esquema de entradas, saídas e processos do ciclo do N na cultura de arroz. Devido ao alcance de esta Tese, serão abordados alguns processos envolvidos na interação manejo da água-adubação-solo-plantas.

O N é o macronutriente mais importante no arroz e seu fornecimento principal é através do próprio solo (N nativo) que aporta entre 50 a 90% do requerimento total (YOSHIDA, 1981; WITT et al., 1999, QUINTERO et al., 2009, MÉNDEZ LARROSA e CHURRUT, 2009; WANG et al., 2011; FAGERIA et al., 2013). Porém, para alcançar altas produtividades nas variedades de arroz modernas, também deve ser provisto através da adubação, tanto mineral como orgânica (DOBERMAN e FAIRHURST, 2000). Uma das principais funções do N é manter altas taxas de fotossíntese, devido à evidência da correlação positiva (linear ou curvilínea) entre a taxa da fotossíntese e a concentração de N nas folhas de arroz (YOSHIDA e CORONEL, 1976). A deficiência desse elemento incrementa a resistência estomática e, em consequencia, diminui a fotossíntese (YOSHIDA, 1981).

Figura 6 - Esquema conceitual de entradas, saídas e processos do ciclo do N em arroz de terras baixas com inundação contínua (lc), com lâmina permanente (h) em superfície e saturação do solo até o lençol freático

A importância do conhecimento sobre o ciclo do N (Figura 7) consiste em que a planta de arroz pode utilizar esse macronutriente em diferentes formas, além que estão no solo em função das condições de aeração, daí as trocas que ocorrem segundo os manejos da água.

A uréia é o principal adubo sólido utilizado na agricultura mundial (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000), sendo transformada a bicarbonato de amônio, primeiro, e amônio, após, através da hidrólise (PATRA, BURFORD e REGO, 1996). Para ser hidrolisada necessita a enzima uréase, que se encontra tanto na biomassa microbiana quanto na solução ou nos colóides do solo, proveniente de organismos mortos. Quando a uréia é aplicada diretamente sob a lâmina h não permite a hidrólise devido à ausência na água dessa enzima (VLEK, STUMPE e BYRNES, 1980). Estes autores determinaram que, após aplicar uréia com $15N$ na superfície enlodada do solo (semelhante ao manejo I_n), em torno de 50% ficou na água da inundação (sobrenadante), sendo fortemente hidrolisada na interface solo-água e após retornar à água de inundação (80%), no entanto o restante 20% ficou retida no

solo. A fração que retornou à água de inundação foi absorvida pelas algas ou volatilizada como NH_3 . Norman, Wilson e Slaton (2003) determinaram perdas entre 11 a 40% do N aplicado sob a lâmina de água, no entanto Larrosa e Churrut (2009) referem concentrações de amônio na camada superficial do solo muito baixas (média de $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$) e estáveis, com doses de até 60 kgN ha^{-1} aplicadas como uréia em solo inundado, o que significou uma recuperação aparente do N (RAN) de só 20%.

Figura 7 - Ciclo do N num ecossistema com inundação contínua. (Adaptado de Reddy, 1982)

Em Santa Maria, Brasil, foi avaliada a aplicação de diferentes doses de N como uréia em três condições: a) a lanço sob solo drenado, sendo no dia seguinte realizado um banho (inundação com retiro da água) com a inundação definitiva 15 dias após; b) igual à anterior, mas com inundação definitiva ao dia seguinte e c) sob

a lâmina de água ao dia seguinte da inundação. Oito dias após da aplicação da uréia, a concentração média (a e b) de amônio na camada superficial do solo (0,10 m) foi de 7,95 mg kg⁻¹, no entanto em c) foi à metade (MÉNDEZ LARROSA e CHURRUT, 2009). Do anterior se deduz que aplicar uréia com solo inundado não é recomendável.

A volatilização de NH₃ é uma reação dependente do pH e das temperaturas, já que com pH neutro ou ácido predomina NH₄⁺ na solução do solo ou na água de inundação (REDDY, 1982), no entanto com pH acima de 7, o NH₄⁺ resultante da hidrólise, em combinação com OH⁻, gera NH₃ gasoso (REDDY, 1982; PATRA, BURFORD E REGO et al., 1996). Por outra parte, com pH menor a 7,5 as perdas por volatilização de NH₃ seriam desprezíveis, embora importantes no intervalo de 8 a 10 (REDDY, 1982). As algas crescendo na água armazenada na superfície também são responsáveis do aumento do pH, devido ao processo de fotossíntese que remove o CO₂ e alcaliniza a água. Experimentos com algicidas indicam uma menor presença de NH₃ aquoso ao meio-dia (VLEK, STUMPE e BYRNES, 1980).

A chave para evitar a perda de NH₃ de modo gasoso seria impedir ou prevenir a formação do NH₃ aquoso na hidrólise da uréia. Para isto, podem ser utilizados inibidores de uréase que retardam o diminuem a conversão de uréia a NH₃ aquoso (VLEK, STUMPE e BYRNES, 1980), embora a relação custo/benefício ainda não é suficiente para sua utilização pelos orizicultores (DOBERMAN e FAIRHURST, 2000). Outra forma seria aplicando a uréia no interior do solo (REDDY, 1982) fato que ocorre na semeadura em seco, mas não quando a adubação é feita prévio a inundação. Porém, podem ocorrer outras perdas de N (nitrificação-desnitrificação) devido a que em profundidade e com inundação, a camada de solo fica reduzida.

Outra perda de N por volatilização de NH₃ deve-se à fotorrespiração, processo próprio das plantas C3 para fixar CO₂. Norman, Wilson e Slaton (2003) refere valores de até 65 kgN ha⁻¹ durante o período de enchimento dos grãos, com grande sensibilidade segundo os cultivares e alta probabilidade de ocorrer em verões muito quentes. Quintero et al. (2009) determinaram taxas negativas de absorção de N no período final do ciclo em variedades índica e japônica cultivadas em Entre Ríos, Argentina, sendo provável a ocorrência de volatilização de NH₃.

A desnitrificação também é uma perda de N. Neste processo, baixo condições de solo saturado e sem oxigênio (Figura 7), os micro-organismos presentes no solo fixam O₂ do NH₃, que rapidamente é reduzido a óxido nitroso ou

diretamente N_2 , gases que são liberados à atmosfera (REDDY, 1982). A desnitrificação não é desejável, difícil de medir no campo e quantifica-se segundo balance de massa do N. Ao respeito, uma pesquisa em arroz cultivado em Louisiana (EUA), refere que só 33% do N inorgânico foi recuperado pelo arroz, sendo as principais perdas a difusão do amônio desde estratos anaeróbicos (ubicados a maior profundidade) a estratos aeróbicos em resposta ao gradiente de concentração (próprio do processo de difusão) e subsequente nitrificação no seu interior, difundindo-se o nitrato novamente ao estrato anaeróbico, para ser reduzido e se perder como gás (REDDY, 1982).

Altas perdas por desnitrificação podem ocorrer quando se aplica N como nitrato antes da inundação ou também como amônio embora muito tempo prévio, permitindo a nitrificação pelos micro-organismos. Se o nitrato fosse a principal fonte de N no solo, a desnitrificação concorre com o arroz quando começa a inundação (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003).

Para que ocorra desnitrificação, previamente houve nitrificação, que é a transformação microbiana de amônio a nitrato. O substrato de amônio pode ter origem tanto na mineralização da MO como na adubação. É um processo sem perdas nem ganhos ao nível do balanço e o arroz pode absorver um ou outro, como já foi analisado. A nitrificação ocorre em presença de oxigênio tanto prévio à inundação ou, após dela, nas capas oxidadas (Figura 7).

Outros processos que também não afetam o balanço do N no solo, embora tenha impacto na sua disponibilidade pelas plantas são (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003): i) mineralização-imobilização pelos micro-organismos do solo, ii) adsorção do amônio pela argila, que frequentemente apresenta cargas negativas em suas capas, e iii) fixação do amoníaco pela MO. A mineralização é o processo pelo qual o N orgânico passa a formas minerais, nitrato ou amônio, no entanto a immobilização é o contrário, quando micro-organismos assimilam N mineral. Em ambos os casos participam micro-organismos do solo e ambos ocorrem em simultâneo, predominando um sobre outro em função da relação C/N da palha e da quantidade de N orgânico presente (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003). No caso que a palha tenha alta relação C/N, haverá immobilização líquida porque os micro-organismos necessitam N mineral, no entanto se fosse baixa ocorre mineralização líquida. Um caso particular de mineralização em condições anaeróbicas (zona c) é denominado amonificação, isto é transformação da MO em

amônia, solúvel e intercambiável com as cargas negativas da argila, sendo a sua vez um processo muito mais lento que a nitrificação. A decomposição da MO em condições anaeróbicas permite que seja mais estável, com tendência à humificação antes que a conformar a fração lábil, mais instável. Em solos argilosos a tendência é mais acentuada (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000). Além disso, nas condições onde o arroz é plantado sob solo altamente movimentado (puddling), situação extrema na qual ex professo destrói-se a estrutura do solo para evitar perdas de água, os efeitos da MO estão relacionados com sua aporte ao fornecimento de nutrientes (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000).

O transporte de N em solos inundados ocorre via difusão dos íons, percolação ou fluxo lateral como solutos na solução do solo ou com a água do escoamento superficial (REDDY, 1982).

Com taxas de adubação padrão (50-100 kg N ha⁻¹) para arroz ANA, entre 20 e 30% do N aplicado na semeadura ou prévio à inundação e entre 10 a 20% quando fosse aplicado a mediados do ciclo é imobilizado pela fração orgânica do solo, ficando indisponível para a cultura (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003). Valores similares de imobilização (33 a 37%) foram reportados por Wang et al. (2011), sem correspondência entre imobilização e posterior mineralização, devido a só 10% do N imobilizado ao final de um ciclo de arroz foi aproveitado no ciclo seguinte (WANG et al., 2011).

Em solos com alta umidade ou saturados, a uréia rapidamente é hidrolisada e se transforma em amônio, decaindo potencialmente com o tempo, isto é, 50% ao 1º dia após de sua aplicação, 70 a 80% entre 3 a 4 dias e 98% a 100% entre 10 a 13 dias (REDDY, 1982, NORMAN, WILSON e SLATON, 2003), no entanto Wang et al. (2011) refere que o N (amônio + nitrato) está disponível na solução do solo entre 10 a 16 dias após de aplicar uréia.

Em solos com inundação e adubação com uréia, a presença de amônio é muito mais importante que o nitrato (10:1) (WANG et al., 2011). Além disso, o amônio permanece mas tempo estável no manejo Ic que no In, embora aos 68 dias após de transplante já não há amônio na camada superficial (0-0,1 m) do solo, pela absorção da cultura (WANG et al., 2011). Norman, Wilson e Slaton (2003) relatam que o N aportado pela adubação fornece à cultura desde emergência até início da etapa reprodutiva, sendo o N do solo quem fornece desde esta etapa até o final do ciclo. Este último pode prover de duas formas, com diferenças na velocidade de

mineralização, sempre a partir do N orgânico: uma rápida e outra lenta, sendo a primeira melhor absorvida pela planta na etapa inicial e a lenta desde a metade do ciclo até o final (REDDY, 1982). Pesquisas com incubação de solo em laboratório indicam taxas de 0,58 kgN NH_4^+ ha^{-1} para solos inundados de Louisiana, EEUU, o que representou 60% do requerimento total da cultura, e pelo tanto menor uso de adubação (REDDY, 1982).

Uma pesquisa feita na Índia com Vertissolos e condições de secagem-umedecimento da superfície do solo indicou que as perdas por volatilização de NH_3 foram maiores quando, após do secagem, o solo foi re-umedecido (PATRA, BURFORD e REGO, 1996). Devido à rápida hidrólise da uréia nesses solos (24 h), aumentou o pH, condição que favoreceu as perdas por volatilização. Altas temperaturas provocam secagem da superfície, reduzindo a umidade do solo, porquanto as perdas por volatilização são diminuídas devido a insuficiente umidade para as reações químicas e bioquímicas. Quando o solo é re-umedecido (lâminas de PP ou de irrigação ligeiras) há novamente umidade para reiniciar as reações antes mencionadas e as perdas por volatilização aumentam (PATRA, BURFORD e REGO, 1996). Pesquisas avaliando gases com efeito estufa, e também alternando umedecimento via irrigação e posterior secagem por absorção de água pela cultura, determinaram que o N volatilizado foi N_2O (NOBORIO et al., 2011; CANTOU et al., 2012).

Quanto aos indicadores de eficiência dos macronutrientes, principalmente do N, há uma grande variedade de definições utilizadas por diferentes autores. A grandes traços se diferenciam em considerar a biomassa produzida (total ou grão) em relação à quantidade de N absorvida ou disponível (EIN, RIN, EFisN, EUN). Outro grupo de indicadores de eficiência considera a diferença de absorção de N ou a diferença de produtividade produzida entre manejos com e sem adubação, em relação à quantidade de adubo aplicada (RAN e EAN). A utilização de uma ou outra tem como finalidade poder definir com a melhor precisão possível as doses de adubação requeridas pela cultura segundo a meta de produtividade a lograr.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Região de estudo

De acordo com a classificação de Thornthwaite, o clima da região é sub-úmido úmido (C2), mesotermal (B'3) (MOSCONI et al., 1981). A vegetação nativa é constituída de florestas, savanas e pastos naturais com comunidades hidrófilas (HILGERT et al., 2003). As máximas precipitações ocorrem durante o verão, enquanto que as mínimas ocorrem no inverno, sendo que entre 1982 e 2000, a precipitação média anual foi de 1.063 mm. A água para irrigação é extraída do rio San Javier, braço do Paraná (condutividade elétrica de $0,115 \text{ dSm}^{-1}$) e conduzida através de canais de terra (sem revestimento) até as parcelas (CARNEVALE et al., 2011).

3.2 Áreas experimentais

Para considerar a variabilidade interanual dos principais fatores meteorológicos que tem influência no desenvolvimento da cultura (precipitações pluviais, insolação, ventos, temperaturas do ar) os experimentos foram feitos em duas safras. Além disso, foram selecionados dois agro-ecossistemas, que serão caracterizados a seguir.

3.2.1 Agro-ecossistema Várzea (Vz)

A inclusão do termo agro-ecossistema obedece à necessidade de envolver um sistema real de produção agropecuária no ecossistema, neste caso arroz em combinação com gado, para assim poder caracterizá-lo em relação ao ecossistema (PILATTI et al., 2011).

O agro-ecossistema Vz ocupa uma superfície em torno de 120.000 ha estendidas de leste a oeste e corresponde a áreas com relevo muito plano (declividade média entre $0,0005$ a $0,0001 \text{ m m}^{-1}$), solos de textura fina, altos conteúdos de Na^+ e drenagem impedida (PILATTI et al., 2003). O escoamento superficial ocorre predominantemente pelo gradiente hidráulico antes que o topográfico, os cursos de água naturais estão longe e o lençol freático encontra-se perto da superfície do terreno todo ano (MARANO et al., 2013). A vegetação nativa são comunidades herbáceas de tipo hidrófitas e halófilas, adaptadas a condições

prolongadas de alagamento alternadas com momentos de deficiências hídrica no quais aumentam os teores de sais na superfície do solo pela ascensão capilar (HILGERT et al., 2003). O solo predominante é Planossolo nátrico (PlaNa), com baixa capacidade de infiltração e drenagem impedida (PILATTI et al., 2003). A paisagem foi altamente antropizada, mudando as comunidades herbáceas por arroz irrigado, com uma distância média do rio San Javier de 15 km (Figura 8).

Neste agro-ecossistema foi desenvolvido o experimento na safra 2011-12, num lote de produtor situado no município de San Javier, Província de Santa Fe (30° 30' 42" Latitude Sul e 59° 57' 29" Longitude Oeste), Argentina (Figura 9). Além das características físico-químicas principais da série do solo descritas por Pilatti et al. (2003), foram feitas determinações no Laboratório de Aguas y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral (FCA-UNL). Para isso foram extraídas amostras de solo deformadas nas camadas (m): 0 - 0,11; 0,11 - 0,25; 0,25 - 0,45 para realizar as seguintes determinações: Carbono Orgânico (CO), segundo Walkey e Black (SAMPLA, 2004); Nitrogênio total (Nt, KJELDAHL); P segundo Bray e Kurtz N° 1, (SAMPLA, 2004); pH atual (solo: água relação 1:2,5); Condutividade elétrica do estrato de saturação (CEe) (SAMPLA, 2004); Ca⁺⁺ e Mg⁺⁺ trocável (extração com NH₄Ac, titulação com EDTA); Na⁺ e K⁺ trocável (extração com NH₄Ac, medição com fotometria de chama) e capacidade de troca de cátions (CTC, extração com NH₄Ac e destilação). A percentagem de sódio trocável (PST) foi obtido como a relação entre a concentração de Na⁺ e a CTC. A MO foi calculada a partir do fator convencional 1,724 de Van Bemmelen (FASSBENDER e BORNEMISZA, 1987), que supõe que a MO do solo tem 58% de C.

Este lote não teve rotação agrícola, com sequência arroz sobre arroz nos últimos 15 anos e, além disso, o gado pasteja a palha do arroz no inverno (meses de maio até agosto) como uma relação de 1 cabeça cada 2 ha.

3.2.2 Agro-ecossistema Terraço (Tç)

Este agro-ecossistema é um área adjacente à beira do Paraná que ocupa uma superfície de 37.000 ha, estendida de norte a sul. Pertenece a um campo de dunas longitudinales formadas pelos ventos (RAMONELL et al., 2013) e, ainda que desde a geomorfologia não seja estritamente de origem fluvial, o sitio é comumente denominado "Albardón Costero Santafesino". O solo tem melhor drenagem, sem

presença de Na^+ , declividade também plana, porém, de maior magnitude (média de $0,001 \text{ m m}^{-1}$). A presença do rio San Javier nas imediações significa uma via de saída rápida tanto para o fluxo superficial como do lençol freático (Figura 10). Outra diferença com o agro-ecossistema Vz consiste na possibilidade de fazer rotação agrícola (trigo-soja-milho) devido ao solo apresentar boa drenagem. O lote se

ter

do

Figura 8 - Agro-ecossistema Várzea (Vz) com área experimental com solo PlaNa, Río San Javier a leste e córrego Saladillo a oeste
 Fonte: Google Earth, ingresso 10-01-14

Figura 9 - Detalhe área experimental no agro-ecossistema Várzea (Vz) com solo PlaNa e lote com curvas de nível
 Fonte: Google Earth, ingresso 10-01-14

Devido à movimentação do solo para fazer a sistematização, foi feita uma amostragem para cada bloco, visando encontrar diferenças entre eles. A metodologia de extração de amostras e determinações de laboratório foram as mesmas que no caso anterior.

Figura 10 - Detalhe área experimental no agro-ecossistema Terraço (Tç) com solo RegAb e lote sistematizado com declividade zero

Fonte: Google Earth, ingresso 10-01-14

3.3 Conformação das parcelas

As parcelas tinham dimensões aproximadas de 10 m x 10 m -sua superfície exata foi relevada após de sua construção- e cada uma foi circundada por taipas elevadas 0,25 m, compactadas suficientemente para evitar vazamentos e fluxo debaixo das taipas (seepage) e isolar assim o manejo da água entre tratamentos. O perímetro de cada área experimental também foi contornado por uma outra taipa (terraplenagem) para evitar a entrada de água externa (pluviais ou da irrigação). A construção destes bordos foi realizada com uma entaipadeira que tem um rolo lastrado (Figura 11) que permite suficiente compactação para suportar a pressão da água (POZZOLO, 2006), enquanto aquelas não suficientemente compactadas pelo equipamento foram repassadas manualmente. Entre parcelas manteve-se uma distância de aproximadamente 2 m sem plantas para condição de bordadura (BEECHER et al., 2006), que funcionaram também como carregadores. Do mesmo modo, cada uma delas teve um vertedouro construído a uma altura acima de um nível máximo tolerável de 0,10 m (TOESCHER et al., 1997). A drenagem foi feita no próprio carregador, que estava conectado com uma valeta.

3.4 Fonte de água

A água para irrigação foi bombeada do rio San Javier e conduzida até as cercanias da área experimental mediante um canal principal sem revestimento, construído com bordos elevados e aterrados, vulgarmente denominado “valetón”. Deste a água foi derivada a um canal secundário ou “valeta”, onde se localizava um conjunto motobomba de acionamento manual que possibilitou a irrigação das parcelas através de uma rede pressurizada o qual tinha na sucção uma válvula de pé com crivo e no recalque, um sistema de filtragem de tela de 130 Mesh (Figura 12).

Figura 11 - Rolo taipero e grade de discos para conformação das taipas

Figura 12 - Moto-bomba, filtro e tubaria principal de distribuição da irrigação

3.5 Variedade selecionada e práticas culturais

O arroz cultivado corresponde ao tipo índico, tropical-subtropical, grão longo fino (agulhinha), com resistência a herbicida da família das imidazolinonas (clearfield CL). Em ambas safras foi utilizada a variedade Puitá-Inta, com sementes fornecidas pelos produtores, semeada em 11/11/11 e 13/10/12, com densidades de 100 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ respectivamente, mas sempre com 0,21 m entre fileiras.

Na safra 2011-12 a semeadura foi tradicional, com preparo do solo prévio que consistiu em gradagem com três passadas de grade de discos nos meses de junho e julho, o que permitiu eliminar marcas deixadas pelo trânsito da maquinaria durante a colheita. Finalmente em agosto houve uma passada de grade de dentes.

Na safra seguinte foi utilizado o plantio direto, com semeadora pneumática. As sementes foram tratadas com fungicida Vitavax (carboxim+tiram) como método de prevenção ante possíveis ataques de micro-organismos fitopatogênicos no período desde a semeadura até a emergência, com uma dose de 0,2 L a cada 100 kg. Imediatamente após da semeadura, em pré-emergência, foi feita a primeira aplicação do herbicida Kifix com a finalidade de controle do arroz vermelho. Anteriormente à inundação (2 a 4 dias antes) realizou-se uma segunda aplicação com o objetivo de controle de outras plantas daninhas. As pragas foram identificadas e tratadas conforme a sua ocorrência. Para isso houve a colaboração de profissionais do laboratório de Fitopatologia da FCA-UNL.

3.6 Tratamentos e delineamento estatístico

Para o cumprimento das hipóteses e objetivos desta Tese foram considerados dois fatores: A) diferentes manejos da água e B) momento ótimo de aplicação (MOA) e doses de adubação (DA) com nitrogênio (N). Na consideração do fator A, as plantas foram irrigadas segundo o solo e a condição hidrológica. Foram utilizados três manejos da água: a) Ic com altura fixa de água (Ic); b) In e c) AS. A irrigação foi feita mediante a rede pressurizada já mencionada (Figura 13).

Em cada parcela foi instalado um hidrômetro que permitiu determinar a lâmina de irrigação bruta (Lib) a partir da leitura dos volumes registrados. Foi selecionado um modelo comercial (Multimag, classe B ISO 4060), diâmetro e vazão nominal de 20 mm e $2,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ respectivamente, aprovado para ser utilizado na Argentina. Este mesmo modelo também é utilizado no Brasil, e foi ensaiado no Laboratório de Hidráulica da ESALQ. O cálculo da Lib foi feito como a diferença entre duas leituras contíguas divididas pela superfície das parcelas. Nos tratamentos com inundação, após os hidrômetros, a água fluía por gravidade e nos irrigados por aspersão manteve-se pressurizada (Figura 14). Os emissores de aspersão tinham um ângulo de rotação de 360° e foram instalados a uma distância de 5 m entre eles, ficando no centro de cada parcela. Foram do tipo “spray” de média pressão e para sua seleção foram feitos ensaios do perfil de distribuição a diferentes pressões e espaçamentos nos campos experimentais da ESALQ (Fazenda Areão) e da FCA-UNL. Durante o experimento foram distribuídos coletores em cada parcela, com a finalidade de verificar as lâminas, lidos após as aplicações. Nos tratamentos AS

foram colocados tensiômetros de cápsula porosa à profundidade de 0,20 m (safra 2011-2012) e a duas profundidades na safra seguinte (0-10 m e 0,1-0,2 m) que tinham na parte superior uma borracha para leitura manual mediante tensímetro (fabricado no Laboratório de Hidráulica da ESALQ) e também uma derivação com acoplamento para transdutores de pressão (Freescale, modelo MPX5100DP) que permitem ser registrados automaticamente e armazenados em dispositivos eletrônicos (datalogger). Quatro de eles, modelo Cavadevice (Cavasassi SRL), foram colocados na safra 2012-13 nas parcelas AS para registrar as tensões. Para a calibração dos transdutores foram testados dois modelos, um polinômio de 2º ordem e outro linear, utilizando a raiz do erro quadrático médio como indicador do melhor modelo a adotar.

Figura 13 - Montagem da tubulação e hidrômetros

Figura 14 - Sistema de distribuição da tubulação com hidrômetros nas parcelas

Na segunda safra, com base na experiência adquirida no primeiro ano e as novas condições hidrológicas, foram feitas algumas modificações nos manejos da água. Estas consistiram em:

a) Tratamento AS, foi preciso mudar o modelo de aspersor por outro de maior alcance, que pudesse ser utilizado nos vértices das parcelas, com a finalidade de aproveitar toda sua superfície.

b) As condições físicas e hidrológicas da nova área experimental fizeram que o tratamento Ic mudasse, devido não ter sido possível manter uma lâmina fixa e contínua de água nas parcelas. Assim, só foi possível fixar a lâmina durante as horas diurnas, deixar infiltrar a água durante a noite e repor no dia seguinte uma nova lâmina de água.

c) O tratamento In se diferenciou do anterior em que a reposição das lâminas foram feitas em dias alternados, controlando que o potencial da água no solo atingisse -10 kPa (TOESCHER et al., 1997).

Quanto ao Fator B, na primeira safra foi considerado o MOA, no entanto na segunda avaliou-se DA de N.

Os momentos de aplicação do N (safra 2011-2012) foram na semeadura, no perfilhamento e na diferenciação da panícula, resultando dois tratamentos: B1) adubação tradicional (AT), que consistiu em aplicar uma pequena fração (19 kgN ha^{-1} , equivalente a 20%) na semeadura e na fileira (máquina), enquanto que o resto ($78,2 \text{ kgN ha}^{-1}$) foi aplicado a lanço (manual), no perfilhamento e imediatamente antes do começo da irrigação e B2) adubação parcelada (AP), onde também uma pequena fração (19 kgN ha^{-1} , equivalente a 20%) foi aplicada na semeadura, 47% (46 kgN ha^{-1}) no perfilhamento e imediatamente antes do começo da irrigação, e o resto ($32,2 \text{ kgN ha}^{-1}$) na diferenciação da panícula. A eleição destas porcentagens foi feita segundo Quintero (2009).

Os macronutrientes pouco móveis (P e K^+) foram aplicados na fileira junto com as sementes, em todos os tratamentos por igual (19 kg ha^{-1}). Para determinar a quantidade de adubo necessário, aplicou-se um balanço segundo o critério de reposição, (ECHEVERRÍA e SAINZ, 2006) entre as doses de extração de N, P e K^+ da cultura de arroz na região Litoral de Argentina (QUINTERO, 2009) e os macronutrientes fornecidos por o solo. A informação de absorção de N-P-K foi contrastada com os resultados de Witt et al. (1999) e Dobermann e Fairhurst (2000). Os requerimentos nutricionais foram estimados considerando uma produtividade de 10 Mg ha^{-1} de arroz em casca.

Os aportes de N, P e K do solo foram estimados a partir dos dados da análise química do Laboratório. O aporte de nitrogênio nativo (Nnat) durante o ciclo na camada considerada foi a soma dos nitratos no momento da semeadura mais uma quantidade mineralizada do nitrogênio orgânico total (Nt), segundo eq. (1):

$$\text{Nnat} = \text{NO}_{3\text{S}} + \sum_{t=1}^{t=t_c} \text{N}_{\text{min}t} \quad (1)$$

em que:

Nnat - Nitrogênio disponível na camada superficial durante o ciclo da cultura (kg ha^{-1})

$\text{NO}_{3\text{S}}$ - Conteúdo de N-NO_3^- na camada superficial no momento da semeadura (kg ha^{-1})

N_{mint} - Nitrogênio orgânico total que é mineralizado desde o período de semeadura até a maturidade fisiológica (kg ha^{-1})

t_c - Duração do ciclo da cultura desde semeadura até maturidade fisiológica (dias)

Devido às condições de saturação do solo e a flutuação do NO_3^- no período anterior ao da semeadura, adotou-se um valor mínimo de 7 ppm segundo dados de solo obtidos na Região (PILATTI M., com. pers.).

A quantidade de N_{mint} a ser mineralizada foi estimada pela eq. (2):

$$\text{N}_{\text{mint}} = (\text{N}_t \times \text{Fm}) \times [1 - e^{(-\text{Km} \times t)}] \times \text{F}_{\text{H}_2\text{O}} \times \text{F}_{\text{pH}} \quad (2)$$

em que:

Fm - Fração mineralizável do N_t segundo as práticas de manejo do solo, adotando-se um valor de 7% para as condições da Região (PILATTI e GRENÓN, 2008)

Km - Taxa de mineralização da matéria orgânica em função da temperatura (eq. 3) e corrigida segundo conteúdo da água no solo ($\text{F}_{\text{H}_2\text{O}}$, eq. 4) e pH (F_{pH} , eq. 5)

t - Duração do ciclo da cultura desde semeadura até maturidade fisiológica (semanas)

e - Base do logaritmo natural

Tms - Temperatura média do solo na camada superficial ($^{\circ}\text{C}$)

θ_s e θ_{cc} - conteúdos de água no solo em saturação e capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) respectivamente

pH - Reação média do solo na camada superficial.

$$\text{Km} = e^{(17,75 - \frac{6352}{273 + \text{Tms}})} \quad (3)$$

$$\text{F}_{\text{H}_2\text{O}} = -0,08 + 0,88 \times \frac{\theta_s}{\theta_{cc}} \quad (4)$$

$$\text{F}_{\text{pH}} = -0,06 \times (\text{pH} + 0,7)^2 + 0,96 \times (\text{pH} + 0,7) - 3 \quad (5)$$

Para o cálculo da disponibilidade de P e K^+ na camada superficial, expressa em kg ha^{-1} , foram considerados os resultados das análises de solo, calculando a

massa de um hectare até a profundidade da camada superficial e com a densidade obtida no campo.

Os adubos utilizados foram, na semeadura, um formulado de N, P, K em iguais proporções (19-19-19), e após, uréia (48-0-0). Este adubo foi aplicado manualmente, já que a máquina para esse trabalho não pôde ser utilizada nas parcelas devido aos equipamentos e as taipas construídas.

Na safra 2011-2012, o delineamento estatístico adotado foi de parcelas divididas com blocos completos aleatórios (Figura 15), dispondo os tratamentos de momentos de aplicação do N na parcela principal (quatro), enquanto as sub-parcelas receberam os respectivos manejos da água, resultando assim em 24 sub-parcelas (2 x 3 x 4).

O modelo estatístico pode ser representado segundo eq. (6):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (6)$$

em que:

Y_{ijk} - Resposta de cada unidade experimental

μ - Média populacional

α_i - Efeito devido à parcela principal com momentos de aplicação do N

γ_k - Efeito devido aos blocos

$(\alpha\gamma)_{ik}$ - Efeito devido à interação parcela principal x blocos. Esse termo representa o erro que é utilizado para obter o valor de F da parcela principal

β_j - Efeito devido às sub-parcelas com diferentes manejos de água

$(\alpha\beta)_{ij}$ - Efeito devido à interação parcela principal x sub-parcelas

ε_{ijk} - Termo do erro

i - Níveis da parcela principal

j - Níveis das sub-parcelas

k - Número de blocos

Na safra 2012-2013 foram avaliadas diferentes doses de N após a semeadura: T0, testemunha, apenas com N na semeadura (13,3 kgN ha⁻¹); T1, com 20% (36,8 kgN ha⁻¹) do requerimento total de N aplicado a lanço (manual) no perfilhamento e anteriormente ao início da irrigação e T2, com 40% (73,6 kgN ha⁻¹) do requerimento total de N, aplicado igual ao T1. Na semeadura foram aplicados

(máquina) a todos os tratamentos aproximadamente 7% do requerimento total de N para o estabelecimento das plantas.

Figura 15 - Croqui desenho experimental parcela dividida com blocos completos aleatórios, safra 2011-12

Os macronutrientes pouco móveis (P e K) também foram aplicados na fileira junto com as sementes, em todos os tratamentos por igual ($13,3 \text{ kg ha}^{-1}$). Do mesmo modo foi utilizado o critério de reposição de macronutrientes e as necessidades foram estimadas considerando os resultados de absorção obtidos na safra anterior e uma produtividade de 10 Mg ha^{-1} de arroz casca. Os aportes de N, P e K^+ do solo foram estimados a partir dos dados da análise química do Laboratório de Solos (FCA-UNL) e os adubos utilizados foram da mesma composição que na safra anterior; um formulado de N-P-K em iguais proporções (19-19-19) e uréia (48-0-0).

O delineamento estatístico nesta safra mudou em relação à anterior, adotando-se um modelo fatorial com blocos completos aleatórios –três– (Figura 16). O fator A foi manejos da água e fator B doses de N, resultando assim em 27 parcelas ($3 \times 3 \times 3$). A modificação do delineamento em parcelas divididas foi devido a que os adubos foram aplicados manualmente, e portanto não foram necessárias parcelas de grande tamanho (BELDER et al., 2004). Além disso o delineamento fatorial permite maior grau de liberdade do erro.

Figura 16 - Croqui desenho experimental safra 2012-13 modelo fatorial com blocos completos aleatórios

O modelo estatístico pode ser representado segundo a eq. (7):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (7)$$

em que:

Y_{ijk} - Resposta de cada unidade experimental

μ - Média populacional

α_i - Efeito principal devido ao fator A

β_j - Efeito principal devido ao fator B

γ_k - Efeito devido aos blocos

$(\alpha\beta)_{ij}$ - Efeito devido à interação entre os fatores

ε_{ijk} - Termo do erro

i - Níveis fator A

j - Níveis fator B

k - Números de blocos

Os dados de todas as variáveis analisadas foram inicialmente testados quanto ao atendimento das pressuposições do modelo estatístico, à normalidade, à independência dos erros e à homogeneidade das variâncias. A análise das variâncias (ANAVA) e teste de médias LSD (Fischer) foram avaliados com o pacote estatístico InfoStat (2012).

3.7 Balanço hídrico (BH)

Para poder quantificar adequadamente cada variável que influencia os tratamentos avaliados, foi realizado o BH para cada parcela, no período de irrigação, que compreende os dias desde a primeira inundação até a maturidade fisiológica da cultura, segundo a eq. (8):

$$Lib + PP + Ac - ETr - (PerIr + PerP + Ds + Dss) - h - \Delta L = 0 \quad (8)$$

em que:

Lib - Lâmina de irrigação bruta (mm)

PP - Precipitação pluviométrica total (mm)

ETr - Evapotranspiração real da cultura (mm)

h - Lâmina de água armazenada acima do solo, requerida nos tratamentos Ic e In (mm)

ΔL - Variação da água armazenada na profundidade efetiva das raízes, entre o início e final do período da irrigação (mm)

PerIr - Percolação profunda (mm) com origem na irrigação

PerP - Percolação profunda (mm) com origem nas PP

Ds - Drenagem superficial (mm)

Dss - Drenagem sub-superficial (*seepage*) (mm)

Ac - Ascensão capilar (mm)

A lâmina de irrigação líquida (Li_L), no caso dos tratamentos Ic, foi estimada segundo eq. (9):

$$Li_L = Lib - (PerIr + Dss + h) \quad (9)$$

Para os tratamentos In o cálculo da Li_L foi também com eq. (9), sem considerar h , e para os tratamentos AS, os termos da eq. (8): h , D_{ss} , Ac e Per_{lr} foram considerados desprezíveis e Li_L foi calculada com as eq. (10) e eq. (11):

$$Li_L = Lib \times E_{Ap} - Per_{lr} \quad (10)$$

$$E_{Ap} = \frac{L_{mc}}{Lib} \quad (11)$$

Substituindo eq. (9) ou eq. (10) em eq. (8), resultam as eq. (12) e eq. (13):

$$E_{Tr} = Li_L + Pe - \Delta L \quad (12)$$

$$Pe = PP - (Per_P + D_s) \quad (13)$$

em que:

E_{Ap} – Eficiência de aplicação potencial (BERNARDO, SOARES E MANTOVANI, 2006)

L_{mc} - Lâmina média coletada (mm), obtida a partir das leituras dos coletores instalados nas parcelas irrigadas com aspersão

Pe – Precipitação efetiva (mm)

A partir da E_{Tr} estimada segundo balanço hídrico, foram obtidos os valores de coeficiente único de cultivo (K_c), eq. (14), proposta por ALLEN et al. (2006):

$$K_c = \frac{E_{Tr}}{E_{To}} \quad (14)$$

em que:

E_{To} - Evapotranspiração de referência, obtida a partir da equação de Penman-Monteith com procedimento desenvolvido em FAO 56 (ALLEN et al., 2006);

A eq. (14) permitiu obter valores de E_{Tr} e de K_c para diferentes estádios fenológicos do arroz.

Para o cálculo de ETr com a eq. (12), as chuvas que aconteceram antes e depois do período de irrigação não foram consideradas. Neste período predominou principalmente a evaporação do solo, e a estimativa de ETr foi feita com valores de Kc adaptados de Allen et al. (2006).

Nas equações de balanço hídrico, ΔL fica com sinal negativo pela convenção de se fazer a diferença entre o período final menos o inicial. Assim, se for positivo, significa que ficou água acumulada no perfil, que para esse período, é uma perda. Para seu cálculo, consideraram-se as eq. (15), eq. (16), eq. (17), eq. (18) - tratamentos Ic e In- e eq. (19) -tratamento AS-:

$$\Delta L = L_f - L_i \quad (15)$$

$$L_f = \theta_f \text{ Esp} \quad (16)$$

$$L_i = (\theta_s - \theta_i) \text{ Esp} \quad (17)$$

$$\theta_s = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \quad (18)$$

$$\Delta L = (\theta_f - \theta_i) \text{ Esp} \quad (19)$$

em que:

θ_s - Conteúdo de água no solo saturado ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), estimado segundo eq. (18)

θ_i - Conteúdo de água no solo no início de irrigação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

θ_f - Conteúdo de água no solo no final do período de irrigação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

Esp - Profundidade efetiva das raízes (mm)

ρ_s e ρ_p - Densidades de solo e de partículas respectivamente (Mg m^{-3}). Esta última estimada segundo a matéria orgânica do solo (PILATTI, GHIBERTO e IMHOFF, 2006).

Não foi considerada a componente Dss dado que as taipas foram compactadas, impedindo o movimento lateral da água, além de alagar os carreadores;

A variável Ds para este trabalho foi considerada com origem só nas precipitações, supondo que a irrigação não gera escoamento devido ao controle das lâminas aplicadas. Sua estimativa nos tratamentos Ic foi feita considerando só aquelas precipitações que superaram à diferença entre o nível máximo dos

vertedouros das parcelas (0,15 m) e a altura h. Nos tratamentos In e AS, nos quais não acumula-se uma lâmina permanente, Ds foi considerada desprezível.

A determinação da percolação nas parcelas foi feita com diferentes metodologias:

a) Nos tratamentos In foram instaladas quatro caixas de material não corrosivo, com 0,4 e 0,8 m de altura e diâmetro, respectivamente, sendo enterrada a 0,25 m de profundidade no solo e ficando 0,10 m acima. Nelas foram colocadas duas réguas graduadas, uma no exterior e outra no interior da caixa, de modo que a diferença de leituras das duas réguas correspondeu à percolação profunda (BELDER et al., 2004; BOUMAN et al., 2005). A seleção do método intermitente para a determinação da Perl foi pela possibilidade de aplicação de uma altura variável de água que depois fosse consumida pelas plantas. O solo colocado nas caixas correspondeu ao escavado para sua instalação, dias depois da semeadura e com igual umidade das parcelas. As plantas nas caixas foram semeadas manualmente e com a mesma densidade do tratamento.

Os valores obtidos para In são também aplicáveis a Ic, devido que em ambos casos o solo encontra-se saturado.

b) Nos tratamentos com predomínio de fluxo insaturado, a percolação foi avaliada mediante a equação de Darcy-Buckingham, eq. (20):

$$q = -Kh(\theta) \frac{dH}{dz} = -Kh(\theta) \left(\frac{d\psi_m}{dz} + 1 \right) \quad (20)$$

em que:

q - Densidade do fluxo (mm d⁻¹)

Kh (θ) - Condutividade hidráulica não saturada (mm d⁻¹)

Ψ_m – Potencial mátrico (m)

z - Profundidade do perfil (m)

Ψ_m foi medido com tensiômetros instalados nas profundidades já mencionadas. Por convenção, a diferença de potenciais deve ser entre o estrato superior menos o inferior, de modo que se q resulta com sinal negativo, significa movimento vertical descendente (Perl) e no caso contrário, Ac.

A estimação da $K_h(\theta)$ foi feita com o modelo de Genuchten (1980) de acordo com eq. (21):

$$K_h(\theta) = K_{h_s} S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$
(21)

em que:

θ - Conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), determinado no campo ou estimado a partir da curva de retenção hídrica (CRH)

θ_s - Conteúdo de água no solo a saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_r - Conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

K_{h_s} - Condutividade hidráulica saturada (mm d^{-1})

n e m - Parâmetros de ajuste da equação de Genuchten, adimensionais

l - Parâmetro de conectividade de poros, adimensional

3.8 Infiltração e Condutividade hidráulica

Na área dos experimentos foram realizadas as medições de infiltração com o método de duplos anéis para determinar a curva de velocidade de infiltração (VI) mediante a equação de Kostikov (FORSYTHE, 1975), eq(22):

$$I_{cum} = Ak \times t^B$$

$$VI = a \times t^{-b}$$
(22)

em que:

Ak , B , a e b são parâmetros de ajuste de Kostikov

A taxa de infiltração básica (VIB) foi determinada com procedimento de Grassi (1987).

Para obter K_{h_s} na camada superficial do solo foram utilizados tensioinfiltrômetros (PERROUX e WHITE, 1988), aplicando três tensões (τ): 0, 1,5 e 3 cm em sitios adjacentes para o cálculo da K_{h_s} segundo Ankeny et al. (1991). Essa

sequência de medições foi realizada nas duas áreas experimentais e com quatro repetições.

Também foi utilizado o modelo de infiltração de Green e Ampt, modificado por Mein e Larson (1973), GAML, segundo eq. (23), eq. (24), eq.(25) e eq. (26):

$$F_s = \frac{[(\theta_s - \theta_i) \Psi_{mf}]}{\left[\left(\frac{I}{Kh_s} - 1 \right) \right]} \quad (23)$$

$$T_p = \frac{F_s}{I} \quad (24)$$

$$t = T_p + \frac{1}{Kh_s} \left[F - F_s + (\theta_s - \theta_i) \Psi_{mf} \ln \left\{ \frac{|\Psi_{mf}|(\theta_s - \theta_i) + F_s}{|\Psi_{mf}|(\theta_s - \theta_i) + F} \right\} \right] \quad (25)$$

$$f(t) = Kh_s \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) \Psi_{mf}}{F} \right] \quad \text{para } t > T_p \quad (26)$$

$$f(t) = I \quad \text{para } t \leq T_p$$

em que :

F_s – Lâmina infiltrada no tempo de empoçamento (cm)

F – Lâmina infiltrada acumulada (cm)

I – Intensidade de precipitação (cm h^{-1})

θ_i - Conteúdo inicial de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

T_p – Tempo teórico do início do empoçamento (h)

t – Tempo após do empoçamento (h)

Ψ_{mf} – Potencial mátrico na frente de umedecimento (cm)

$f(t)$ - Velocidade de infiltração (cm h^{-1})

3.9 Curva de retenção, densidade de solo, resistência à penetração e granulometria

Foram feitas determinações da curva de retenção hídrica do solo (CRH), de densidade de solo (ρ_s), de resistência à penetração do solo (RP) e granulometria em ambos solos. Para as três primeiras, foram extraídas amostras indeformadas em duas profundidades (0-0,11 m e 0,11-0,25 m) no solo PlaNa e quatro (0-0,1 m; 0,1-

0,19 m; 0,19-0,4 m e 0,4-0,6 m) no solo RegAb, com o método de amostradores mais anel volumétrico (trado com anéis metálicos de 5 cm de altura x 5 cm de diâmetro) segundo Blake e Hartge (1986).

Para determinar a granulometria foram extraídas amostras deformadas nas mesmas camadas, secas ao ar, moídas e peneiradas com crivo nº 10. Em 50 g de solo seco foi eliminada a matéria orgânica com peróxido de hidrogênio e os carbonatos com ácido clorídrico, e após foram dispersas com hexametáfosfato de sódio e agitadas por 16 h. A distribuição do tamanho das partículas foi determinada pelo método da pipeta (GEE e BAUDER, 1986). As frações argila ($< 2 \mu\text{m}$), silte (2 a $50 \mu\text{m}$) e areia ($> 50 \mu\text{m}$) foram quantificadas e, além disso, a areia foi dividida por tamanhos com peneiras 270, 140, 60, 35, 18 e 10, segundo USDA.

Na safra 2011-12, com semeadura tradicional, os momentos de amostragem dos anéis foram dois. Um antes do começo do preparo do solo (maio) e o seguinte no momento de emergência das planta, devido a observar que a camada superficial (0-0,11 m) estava adensada e interessou obter a densidade no momento inicial de crescimento. Já no lote com plantio direto, foram extraídos os anéis num só momento, imediatamente após da semeadura. No total foram obtidos 16 anéis por profundidade, cuidando-se para não provocar compactação nem destorroamento das amostras, isolados em papel alumínio para seu transporte ao laboratório e com as devidas identificações.

No laboratório procedeu-se ao acabamento do solo no anel de modo que o mesmo ficasse completamente preenchido de material. Um grupo de anéis (4) foi colocado em estufa a 105°C durante 24 h para obter massa seca e determinar ρ_s , e o restante dos anéis foram saturados lentamente e após processados para obter a CRH com τ : 0,5, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa na mesa de tensão (funil de Haynes) e τ : 30, 100, 500 e 1500 kPa com placas porosas e panela de pressão (câmara de Richards).

Uma vez alcançado o equilíbrio para cada τ foram pesados e novamente colocados na mesa de tensão ou panela de pressão para levá-los à τ seguinte. Com os conjuntos de dados de τ obtidos e seus respectivos conteúdos de água (θ) foram ajustados os parâmetros da eq. (27) (GENUCHTEN, 1980), utilizando a função solver do Excel.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1$$
(27)

Em outro grupo de anéis e com τ : 4, 30, 100 e 500 kPa de modo a contar com uma gama de conteúdos de água, foram feitas as determinações de RP com um penetrômetro eletrônico. O equipamento tem uma velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$, e equipado com uma célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador, conforme descrito por Tormena et al. (1998). Os valores obtidos (kgf cm^{-2}) foram multiplicados pelo fator 0,098 para transformação em MPa.

Além disso, no dia da colheita da safra 2011-2012 foram extraídos 6 anéis selecionados aleatoriamente das parcelas com Ic para novamente calcular ρ_s e verificar as alterações da porosidade que aconteceram pela inundação do solo. Esses sitios foram cobertos com filme plástico para evitar evaporação da água do solo e avaliar a capacidade de campo. Ao final das medições (30 dias) outros 6 anéis foram obtidos para uma nova determinação de ρ_s . Imediatamente após a colheita e aos 30 dias foram feitas determinações de água no solo com sonda TDR portátil (Delta-T Devices).

3.10 Manejo da irrigação

Na safra 2011-2012, o manejo da irrigação para os tratamentos Ic e In foram iguais no começo, inundando as parcelas em perfilhamento (2 a 3 perfilhos). Em Ic foi mantida uma altura da água constante, inicialmente (15 a 20 dias) de 3 a 4 cm e após esse período, a lâmina foi mantida entre 6 a 8 cm, controladas com régua instaladas em cada parcela. No caso de In, após de cada inundação deixou-se infiltrar a água até o nível do solo e iniciou-se novamente a irrigação, repondo à altura original da lâmina, que foi a mesma que Ic, mantendo assim o solo saturado.

Nos tratamentos AS, a irrigação também iniciou-se no perfilhamento e foram feitas considerando as leituras dos tensiômetros (0-0,2 m), começando quando a média delas atingiu um valor de 25 kPa (STONE et al., 1986; STONE e SILVEIRA, 2004, PINHEIRO et al., 2006). O critério de irrigação utilizado foi a aplicação de uma lâmina fixa com frequência variável, sendo a L_{il} determinada com a eq. (28):

$$Li_L = (\theta_s - \theta_{ur})Esp \quad (28)$$

em que θ_s corresponde ao conteúdo de água em saturação e θ_{ur} ao conteúdo de água no início da irrigação. Os valores de θ_s e θ_{ur} foram obtidos da CRH com τ de 25 e 10 kPa nos solos PlaNa e RegAb respectivamente, no entanto Esp representa a profundidade efetiva das raízes. De acordo com a eq. (28) o solo ficaria saturado depois da irrigação, mas isso não foi um problema para a cultura de arroz. Ao valor assim calculado foi aplicada EAp para obter a Lib.

Além de controlar as leituras dos hidrômetros final e inicial ($Leit_F$ e $Leit_I$ respectivamente, em m^3), também foram controlados os tempos (t , em h) de cada irrigação, de modo que a vazão (Q , $m^3 h^{-1}$) e a pluviometria (PI , em $mm h^{-1}$) aplicadas foram as eq. (29) e eq. (30):

$$Q = \frac{Leit_F - Leit_I}{t} \quad (29)$$

$$PI = \frac{Q \times 1000}{\text{Área parcela}(m^2)} \quad (30)$$

Note-se que as eq. (10) e eq. (28) estão referidas à mesma variável, mas a eq. (28) foi utilizada no manejo da aspersão e a eq (10) no balanço hídrico. Todos os tratamentos foram irrigados até R8 segundo escala de Counce et al. (2000), isto é, aproximadamente 10 dias antes da colheita.

Na safra 2012-2013 houve modificações no manejo devido às condições de solo e hidrológicas e baseadas na experiência da safra anterior. A irrigação começou no perfilhamento para todos os tratamentos. No manejo Ic diariamente foram aplicadas lâminas até atingir uma altura h de 3 cm, no entanto em In as lâminas aplicadas foram de 4 cm, mas em dias alternados. As lâminas foram determinadas em função da VIB, mesmo que, no início de cada irrigação, o solo estivesse saturado nas parcelas Ic, e com Ψ_m em torno de -10 kPa nas parcelas In. Nos tratamentos com AS, a irrigação começou quando a leitura dos tensiômetros superficiais (0-0,10 m) atingiu um valor de -10 kPa e Li_L foi determinada com eq. (28). Para melhor controle, foram calculados os volumes de cada irrigação em função da superfície de cada parcela e das lâminas que deviam ser aplicadas.

3.11 Fenologia e Taxa de crescimento

O acompanhamento da fenologia em ambas safras foi feito segundo a escala de Counce et al. (2000) (Figura 89, ANEXOS) e com frequência semanal.

Foram avaliadas diferentes taxas de crescimento:

- a) Biomassa aérea total (TCBAT);
- b) Biomassa folha verde (TCBFV)
- c) Biomassa folha senescente (TCBFS)
- d) Biomassa bainha + caule (TCBB+C)
- e) Biomassa panícula (TCBP)

Para a avaliação das taxas, obtiveram-se em diferentes momentos, numa superfície de 0,25 m², amostras da parte aérea das plantas. Na safra 2011-2012 eles foram: i) início do perfilhamento (IP), ii) máximo perfilhamento (MP), iii) emborrachamento da panícula (R2) iv) início de enchimento dos grãos (R6) e v) maturidade fisiológica (R8). Já na safra 2012-2013 foram: i) mediado do perfilhamento (MP), ii) emborrachamento da panícula (R2), iii) início de enchimento dos grãos (R6) e iv) maturidade fisiológica (R8). As diferenças de momentos de medição entre safras deveram-se aos momentos de adubação com N.

Das amostras foram contados os colmos (Nºcolmos m⁻²) e separados os órgãos para secar em estufa a 65°C até massa constante. Assim foram calculadas as taxas de crescimento dos diferentes órgãos como as diferenças de massa seca entre um período e o anterior, dividido o número de dias transcorridos entre ambos e expresso em kg ha⁻¹dia⁻¹, segundo eq. (31), eq. (32), eq. (33), eq. (34) e eq. (35):

$$TCBAT = \frac{BAT_{acum2} - BAT_{acum1}}{t_2 - t_1} \quad (31)$$

$$TCBFV = \frac{BFV_{acum2} - BFV_{acum1}}{t_2 - t_1} \quad (32)$$

$$TCBFS = \frac{BFS_{acum2} - BFS_{acum1}}{t_2 - t_1} \quad (33)$$

$$TCBB + C = \frac{BB + C_{acum2} - BB + C_{acum1}}{t_2 - t_1} \quad (34)$$

$$TCBP = \frac{BP_{acum2} - BP_{acum1}}{t_2 - t_1} \quad (35)$$

3.12 Índice de Área Foliar (IAF) e Área Foliar Específica (AFE)

Foram feitas medições de IAF e AFE em três momentos do ciclo (pleno perfilhamento, diferenciação da panícula e floração). Para isso foi selecionada aleatoriamente uma alíquota de cada amostra de plantas, que representou aproximadamente 10% do total dos colmos. Desta alíquota separaram-se as lâminas verdes e mediu-se sua superfície (Sf_{aliq}) com medidor LI-COR mod. LI-3000 A. Após as alíquotas das lâminas verdes foram secas em estufa a 65°C até massa constante e ponderou-se o IAF segundo eq. (36):

$$IAF = \frac{Sf_{aliq} (m^2)}{0,25 m^2} \times \frac{BFV (g)}{BFV \text{ alíquota folhas verdes (g)}} \quad (36)$$

AFE ($m^2 \text{ kg}^{-1}$) foi obtida segundo eq. (37):

$$AFE = \frac{Sf (cm^2)}{BFV (g)} \times 10 \quad (37)$$

onde Sf é a superfície das lâminas verdes de cada amostra.

Visando obter uma relação empírica para ser utilizada em medições não destrutivas de superfície de lâminas individuais de arroz, foi utilizada a eq. (38):

$$AF = ke \times L \times C \quad (38)$$

em que:

AF - Área foliar das lâminas (cm^2)

L - Largura (cm)

C - Comprimento (cm)

ke - Parâmetro de ajuste, adimensional, menor a 1

A cada lâmina da alíquota selecionada da amostra de plantas foi medida AF com medidor LI-COR mod. LI-3000 A, junto com L e C. Posteriormente foi feita uma regressão da equação (38) para obter k.

3.13 Componentes da produtividade

Ao final do ciclo e com conteúdos de umidade do grão próximos a 23% foi feita a colheita das plantas. O procedimento foi manual, selecionando aleatoriamente quatro sitios das parcelas que totalizou uma superfície de 1 m². As plantas foram cortadas ao nível do solo, contando o total de colmos e das panículas, escolhendo aleatoriamente uma alíquota de cinquenta panículas para determinar os componentes da produtividade (WEBER et al., 2003; BOUMAN et al., 2006).

Tanto os colmos da alíquota quanto ao resto da amostra foram trilhados manualmente, separando os grãos da palha. Os grãos do resto da amostra foram pesados em balança eletrônica e obtida a umidade (%) com umedímetro para cereais modelo TESMA Plus (TESMA s.a.i.c.) com precisão de +/- 0,2%. Uma fração da palha do resto da amostra foi pesada e secada em estufa a 65°C até massa constante para obter sua umidade. Os grãos e a palha da alíquota foram levados a estufa para secagem e após foram pesados em balança eletrônica. Com estes resultados foram determinadas as seguintes componentes da produtividade:

- a) número de espiguetas vazias (NEv) por panícula, separando-os mediante uma suave corrente de ar e contando manualmente;
- b) número de espiguetas cheias (NEch) por panícula, contando manualmente os grãos afastados segundo procedimento anterior;
- c) número de espiguetas totais (NEt) por panícula, somando os anteriores;
- d) massa de mil grãos (M1000), contando quatro grupos de 250 grãos, pesando com balança eletrônica de precisão e após somando o total.

A componente NEch também foi expressa em percentagem com relação a NEt e denominada FE, fertilidade das espiguetas.

A biomassa de grãos em casca (BG) e da palha (BP_a) foram obtidas com eq. (39) e eq. (40):

$$BG = \left(\text{Msgfal} + \frac{\text{Mugres}}{\left(1 + \frac{Ug}{100}\right)} \right) \times 10 \quad (39)$$

$$\text{BP}a = \left(\text{Mspal} + \frac{\text{Mupres}}{\left(1 + \frac{Up}{100}\right)} \right) \times 10 \quad (40)$$

em que:

Msgfal - Massa seca dos grãos férteis da alíquota (g m^{-2})

Mugres - Massa úmida dos grãos do resto da amostra (g m^{-2})

Ug - Umidade dos grãos do resto da amostra (%)

Mspal - Massa seca da palha da alíquota (g m^{-2})

Mupres - Massa úmida da palha do resto da amostra (g m^{-2})

Up - Umidade da palha do resto da amostra (%)

As unidades de BG e BP_a, segundo equações 39 e 40, são expressas em kg ha^{-1} . Para obter a produtividade (PG), os valores de BG foram corrigidos para 14% de umidade. A biomassa aérea total (BAT) é a soma de BG mais BP_a, e também foi obtido o número de panículas por metro quadrado (NPan m^{-2}) somando as panículas do resto e da alíquota.

Para corroborar os valores de PG obtidos segundo eq (39), uma estimativa pode ser realizada de acordo com a eq. (41):

$$PG = \left(\frac{M1000 \times \text{NEf} \times \text{NPan}}{100} \right) \times 1,14 \quad (41)$$

O índice de colheita (IC) é a relação entre BG e BAT, eq. (42):

$$IC = \frac{BG}{BAT} = \frac{BG}{BG + \text{BP}a} \quad (42)$$

A modo de síntese dos resultados do desenvolvimento da cultura foram desenvolvidos correlações entre PG, componentes da produtividade e variáveis

relacionadas ao crescimento da cultura nos estádios de perfilhamento ativo (PA), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) das safras 2011-12 e 2012-13, utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson com pacote estatístico InfoStat (2012).

3.14 Análise do tecido vegetal

Após a determinação dos componentes da produtividade, foram enviadas amostras de grãos e palha de cada parcela ao Laboratorio de Análisis de Forrajes, Concentrados e Insumos Agropecuarios da Facultad de Ciencias Agrarias, para avaliar a concentração de N nos tecidos vegetais, tanto grão (incluindo casca) como palha. As amostras foram moídas até obter partículas menores a 1 mm e uma alíquota de 0,5 g foi calcinada em mufla a 600°C para posterior digestão com ácido clorídrico (relação 1:3) e gotas de ácido nítrico concentrado; o conteúdo de N expresso em percentagem (%N) foi obtido mediante o método semi-micro Kjeldahl, com destilador semiautomático (Official Methods of Analysis of AOAC International, SAML, 2004).

As concentrações de nitrogênio (CN) de grão e palha obtidas com os análises foram utilizadas para o cálculo das quantidades absorvidas em grãos (AbNG), palha (AbNPa) e total (AbNT), todas elas expressas em kg ha⁻¹. Com os dados anteriores e as quantidades de macronutrientes aplicados nos adubos mais os aportados pelo solo, definiram-se as seguintes eficiências:

- a) Eficiência interna do N (EIN, expressa em kgBG kgN⁻¹) definidas por Witt et al. (1999), como a relação entre PG e a quantidade de N total absorvido (AbNT), eq. (43):

$$EIN = \left(\frac{PG}{AbNT} \right) \quad (43)$$

A inversa da eq. (43), expressa em kgN MgPG⁻¹, representa o requerimento de N (RIN, WITT et al., 1999), que permite comparar entre diferentes regiões produtoras de arroz.

- b) Eficiência fisiológica do N total (E_{FisTN}) e de grãos (E_{FisGN}), expressas em kgMS kgN⁻¹, definidas por Novoa e Loomis (1981) como a relação da BAT ou BG (kg ha⁻¹) com AbNT, eq. (44) e eq. (45):

$$E_{FisTN} = \left(\frac{BAT}{AbNT} \right) \quad (44)$$

$$E_{FisGN} = \left(\frac{BG}{AbNT} \right) \quad (45)$$

- c) Eficiência de absorção do N (E_{AbN}), expressa em kgN kgN⁻¹, como a relação entre AbNT, e a quantidade total de N disponível pela cultura (DisN) que resultam do aporte dos adubos mais N_{nat}, eq. (46):

$$E_{AbN} = \left(\frac{AbNT}{DisN} \right) \quad (46)$$

- d) Recuperação aparente do N (RAN) aplicado na adubação, expressa em %, obtida na safra 2012-2013 e definida por Dobermann and Fairhurst (2000) como a relação entre as diferenças de absorção total do N entre os tratamentos T1 e T2 com relação a T0, e a quantidade de adubo aplicado (AN), eq. (47):

$$RAN = \frac{(AbNT(T1) \text{ ou } AbNT(T2) - AbNT(T0)) \times 100}{AN} \quad (47)$$

- e) Eficiência de uso do N total (E_{UNT}), e de grãos (E_{UNG}), expressas em kg MS kgN⁻¹, obtidas como o produto das respectivas eficiências fisiológicas pela eficiência de absorção, ou também como a relação entre BAT ou BG e a DisN, eq. (48) e eq. (49):

$$E_{UNT} = E_{FisTN} \times E_{AbN} = \left(\frac{BAT}{DisN} \right) \quad (48)$$

$$EUNG = EFisGN \times EAbN = \left(\frac{BG}{DisN} \right) \quad (49)$$

f) Eficiência agronômica do N (EAN), expressa em kg BG kg N⁻¹ (RUSELL et al., 2006), obtida na safra 2012-2013 como a relação entre as diferenças de BG entre os tratamentos T1 e T2 com relação a T0, e a quantidade de adubo aplicado (AN), eq. (50):

$$EAN = \frac{(BGT1 \text{ ou } BGT2 - BGT0)}{AN} \quad (50)$$

O índice de colheita do N (ICN, expressa em kgN kgN⁻¹) representa a relação entre a quantidade absorvida nos grãos (AbNG) em relação à quantidade total absorvida (AbNT), eq. (51):

$$ICN = \frac{AbNG}{AbNT} \quad (51)$$

3.15 Dados coletados

As régua de nível, os hidrômetros e os tensiômetros instalados nas parcelas foram lidas diariamente, antes de cada irrigação. Para calibrar os tensiômetros com dados de campo, primeiro foram feitas leituras dos sensores com registro nos dataloggers e imediatamente após com tensímetro, para posteriormente plotar e obter uma equação de regressão. O processamento dos dados registrados pelos dataloggers (leituras cada 60 minutos) foi feita com a equação ajustada. Os dados de temperatura máxima (Tmax), média (Tm) e mínima (Tmin) do ar (°C), umidade relativa (UR, %), radiação global (RG, W m⁻²) e velocidade de vento (Vv, m s⁻¹) foram obtidos de uma estação meteorológica automática localizada a 5 km, com coleta a cada 30 min. As variáveis anteriores foram processadas com planilha Excel (tabelas dinâmicas) para obter dados diários. No entanto, PP foi registrada com um pluviômetro tipo B, padronizado pelo Serviço Meteorológico Nacional da Argentina, instalado nas parcelas e com leituras diárias. Com Tm (°C) foram feitas as somas

térmicas (ST) para obter os graus dias (GD), para a estimativa teórica da fenologia da cultura e assim comparar com a observada no campo.

3.16 Medições do lençol freático

Na área experimental da safra 2011-2012 foi instalado um poço de observação do lençol freático de quatro metros de profundidade. Como o diâmetro do furo foi de 3" e da tubulação (PVC) foi de 2", fez-se necessário adicionar, entre a parede do furo e a tubulação, pedrisco selecionado entre 1 a 2 mm. Na tubulação foram feitas ranhuras contínuas de 0,5 mm para a entrada da água em seu interior. Foram cotadas tanto a boca do poço como a superfície do solo. Considerando a proximidade do rio, foi feita um nivelamento entre a superfície da água e a superfície do poço de observação e assim conhecer o gradiente hidráulico entre o lençol freático e o rio. As leituras foram feitas semanalmente com registrador de som.

3.17 Eficiências de irrigação e de uso da água

Para cada tratamento foram determinadas cinco eficiências:

- a) Eficiência de aplicação da irrigação (EFa), como sendo a relação entre a lâmina de irrigação líquida e a lâmina de irrigação bruta, eq. (52):

$$EFa = \frac{Li_L}{Lib} \quad (52)$$

Esta eficiência é considerada ao nível de parcela e pode ser comparada com outras culturas irrigadas.

- b) Eficiência total da água (ETa), igual à eficiência anterior, só que consideram-se as precipitações que aconteceram durante o período de irrigação, eq. (53):

$$ETa = \frac{Li_L}{PP + Lib} \quad (53)$$

Esta eficiência é também ao nível de parcela, só que contempla o regime suplementar da irrigação.

- c) Eficiência de uso da água (EUa, em kg m^{-3}) definida como a relação entre BG (kg ha^{-1}) e ETr (mm), eq. (54):

$$EUa = \frac{BG}{10 ETr} \quad (54)$$

Esta forma de calcular possibilita a comparação da EUa desta cultura com outras, tanto com irrigação como sem irrigação.

- d) Produtividade da água (Pa, em kg m^{-3}), definida como a relação entre BG (kg ha^{-1}) e o total da água disponível (chuvas + irrigação, em mm), eq. (55):

$$Pa = \frac{BG}{10 (PP + Lib)} \quad (55)$$

- e) Produtividade da água azul (Paz, em kg m^{-3}), definida como a relação entre BG (kg ha^{-1}) e o total da irrigação, eq. (56):

$$Paz = \frac{BG}{10 Lib} \quad (56)$$

Estas propostas de eficiência servem para serem aplicadas nas condições de arroz irrigado (BELDER et al., 2004; BOUMAN et al., 2007).

3.18 Pegada hídrica

A pegada hídrica (PH) da produção de arroz em casca foi obtida segundo as eq. (57), eq.(58), eq. (59), e eq.(60) (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011):

$$PHc = \frac{AUc}{PG_{Reg}} \quad (57)$$

$$AUc = AUv + AUaz + AUcz \quad (58)$$

$$AUcz = 1000 \times \frac{QNO_3^-}{CNO_3^-} \quad (59)$$

$$PHS = AUc \times SupColhida = PHc \times PAAS \quad (60)$$

em que:

PHc - Pegada hídrica total da cultura, expressa em $m^3 Mg^{-1}$. Com a mesma equação foram calculadas PHv, PHaz e PHcz utilizando AUv, AUaz e AUcz respectivamente

AUc - Volume de água total utilizado na produção da cultura de arroz ($m^3 ha^{-1}$)

AUv - Volume de água utilizado no processo da evapotranspiração e cuja origem é a fração da PP que infiltra, armazena-se no solo e esta disponível para a cultura (água verde) ($m^3 ha^{-1}$)

AUaz - Volume de água utilizado no processo da evapotranspiração e cuja origem é a irrigação (água azul) ($m^3 ha^{-1}$)

AUcz: Volume de água necessário para diluir o conteúdo de NO_3^- derivado da adubação feita na cultura de arroz até níveis padrões segundo o que a normativa exige (água cinza) ($m^3 ha^{-1}$)

QNO_3^- - Quantidade de NO_3^- que necessita ser diluído, obtido como 5% do total do N aplicado (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011) ($kg ha^{-1}$)

CNO_3^- - Concentração permitida de NO_3^- na água subterrânea, considerada como $50 g m^{-3}$ (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011)

SupColhida: Superfície colhida com arroz em Santa Fe, Argentina, expressa em ha, obtida apartir da informação estatística

PAAS – Produção de arroz anual em Santa Fe (Mg)

PHS – Pegada hídrica da produção de arroz em Santa Fe, expressa em $Mm^3 ano^{-1}$. Esta variável foi também calculada com as componentes AUv, AUaz e AUcz obtendo PHSv, PHSaz e PHScz respectivamente

PG_{Reg} - Produtividade do arroz em casca regional, expressa em $Mg ha^{-1}$, obtida apartir da informação publicada em ACPA (2013)

Apartir de Per_{lr} e Per_P e da SupCultura foram determinados os volumes de água verde (Per_v), azul (Per_{az}) e total (Per_T) percolados na região, expressas em $Mm^3 ano^{-1}$. A soma da PHc com a soma dos volumes percolados resultou no volume total disponível (VTD) pela cultura de arroz. Além disso, também foi calculado o conteúdo

de água virtual percolada por unidade de arroz casca produzido, expressa em $\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$, com origem na irrigação (PerVaz), na PP (PerVv) e total (PerVt).

4 RESULTADOS

4.1 Condições meteorológicas

A análise das condições meteorológicas ocorridas em ambas as safras permitiu avaliar tanto os processos biológicos desenvolvidos na cultura de arroz com influência na produtividade como também o desempenho dos manejos da água aplicados.

4.1.1 Temperaturas e Precipitações Pluviais

O trimestre mais quente da Região coincide com o verão austral e, segundo dados históricos, janeiro tem a maior temperatura média, no entanto os meses de fevereiro e dezembro são iguais (Tabela 2). Alguns anos, dezembro e janeiro têm igual Tm, como na safra 2011-12, no mês de fevereiro é muito irregular, quente como na safra 2012-13 e mais temperados como na safra 2012-13, (Tabela 2). Em geral a safra 2011-12 foi mais quente que a safra 2012-13, com Tm mais alta nos meses de janeiro, fevereiro e março (1,5, 2 e 1,5°C) respectivamente. Do mesmo modo Tmax e Tmin nesses meses foram, respectivamente, 2,2, 1,9 e 1,1 °C e 0,5, 2,5 e 1,9 °C mais altas na safra 2011-12 que na safra 2012-13.

Tabela 2 - Médias mensais da temperatura do ar média (Tm), máxima (Tmax) e mínima (Tmin), nas safras 2011-12 e 2012-13 e temperaturas médias históricas (Tm_{his}, série 1991-2012) em San Javier, Santa Fe, Argentina

Mês	Tm (°C)		Tmax (°C)		Tmin (°C)		Tm _{his} (°C)
	Safra 2011-12	Safra 2012-13	Safra 2011-12	Safra 2012-13	Safra 2011-12	Safra 2012-13	
Outubro	19,2	20,8	23,8	25,6	15,0	16,7	20,4
Novembro	24,2	23,9	29,8	29,5	18,9	18,7	22,8
Dezembro	24,7	25,0	30,8	30,7	18,7	20,1	24,9
Janeiro	26,5	25,0	33,1	30,9	20,3	19,8	26,3
Fevereiro	25,9	23,9	31,7	29,8	21,3	18,8	24,9
Março (*)	24,5	23,0	30,1	29,0	19,7	17,8	23,6
Média período	24,2	23,6	29,9	29,3	19,0	18,7	23,8

Nota - (*) No mês de março utilizaram-se só dados correspondentes aos dias com cultura para o cálculo de Tm, Tmax e Tmin.

A importância das temperaturas na cultura do arroz está em relação aos diferentes processos biológicos, tanto em sua etapa vegetativa quanto em sua etapa reprodutiva. Como exemplo, pode-se mencionar a determinação dos graus dia

(GD), considerando para isso a temperatura base (T_b), aquela acima da qual o arroz está em condições de realizar suas funções fisiológicas, crescer e se desenvolver.

Na Figura 17 foi representada a T_{min} crítica (PEREIRA da CRUZ et al., 2006) mostrando que, na safra 2011-12, o mês mais sensível foi fevereiro (pré-floração e antese), no qual só uns poucos dias ocorreram temperaturas abaixo de 17 °C. No entanto, na safra 2012-13, a prefloação e antese ocorreram em janeiro, mas teve poucos dias com temperaturas abaixo de 17 °C (Figura 18).

Em contraposição, valores de T_{max} maiores que 35°C na floração também podem causar esterilidade das espiguetas (FAGERIA, 2007) num período entre 3 a 4 dias antes e 7 a 8 dias após da floração (BOUMAN et al, 2001). Na safra 2011-12 a floração ocorreu no mês de fevereiro e houve poucos dias acima daquele valor (Figura 17); no entanto, a safra 2012-13 foi menos quente, e em nenhum dia ocorreu temperatura acima de 35 °C (Figura 18).

Figura 17 - Temperaturas mínimas (T_{min}), máximas (T_{max} , °C) diárias do ar e precipitação pluviométrica (PP) diária na safra 2011-12 em San Javier, Santa Fe, Argentina

Figura 18 - Temperaturas mínimas (Tmin), máximas (Tmax, °C) diárias do ar e precipitação pluviométrica (PP) diária na safra 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina

A componente PP foi a variável meteorológica mais irregular de todas as avaliadas e houve muita diferença entre safras. Considerando os meses de outubro a março de 2011-12, foi 15% menor que a média histórica, no entanto nesses mesmos meses, foi 34% superior em 2012-13 (Tabela 3), evidenciando que a primeira safra foi menos úmida que a segunda. A distribuição mensal das chuvas apresentou as maiores diferenças entre safras. Em outubro e novembro foram muito similares, mas nos demais meses houve grandes diferenças (Tabela 3). Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro foram muito secos na safra 2011-12, com somente 111,5 mm de precipitação em oito eventos, isto é um terço dos valores históricos, sendo que foi necessária irrigação diária para satisfazer as necessidades de água da cultura, no entanto, em março, as precipitações aumentaram. Na safra seguinte as chuvas foram mais regulares - 406 mm em 14 eventos - e satisfizeram as necessidades da cultura, no entanto, devido às condições de infiltração e percolação do RegAb, elas tiveram menor aproveitamento (Pe). Por consequência das menores precipitações, a UR dos meses de dezembro e janeiro também foi menor na safra 2011-12 (Tabela 3).

Tabela 3 - Umidade relativa (UR) média e precipitação pluviométrica (PP) mensal-safras 2011-12 e 2012-13 e precipitação pluviométrica mensal histórica (PP_{his} série 1991-2012) em San Javier, Santa Fe, Argentina

Mês	UR (%)		PP (mm)		P _{this} (mm)
	Safr 2011-12	Safr 2012-13	Safr 2011-12	Safr 2012-13	
Outubro	79	82	293,0	297,3	121,4
Novembro	71	74	113,6	110,7	104,2
Dezembro	67	79	24,0	247,2	119,8
Janeiro	68	78	57,0	87,8	128,6
Fevereiro	77	79	30,5	164,2	110,4
Março (*)	83	80	108,0	78,2	151,5

Nota - (*) No mês de março utilizaram-se somente dados correspondentes aos dias com cultura para o cálculo de UR, RG e PP.

4.1.2 Radiação Global

Ao contrário de PP, RG é uma variável muito estável. Em função do ângulo de incidência do sol na latitude de San Javier, a RG de dezembro é a maior do ano e um pouco superior à de janeiro. Nas regiões úmidas, as PP geralmente provocam dias nublados que diminuem a quantidade de RG, sendo que na safra 2012-13, com muitos dias com chuvas, RG foi menor em dezembro que em janeiro. No entanto, no ano anterior, sem chuvas em dezembro, RG foi maior nesse mês que em janeiro (Tabela 4) e a média diária de ambos os meses nas duas safras foi $26,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A tendência de RG no ciclo da cultura é um polinômio de segundo grau, com valores máximos entre fines de dezembro e início de janeiro e variações diárias entre 5 a $30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 19).

Devido às distintas datas de semeadura, houve diferenças entre safras de RG acumulada segundo estádios ontogênicos (Tabela 5). Na safra 2012-13, com semeadura no mês de outubro, RG do estágio I foi menor que a safra anterior, mas no estágio III foi maior, devido à floração naquela safra ter ocorrido em janeiro. Porém, a RG total do ciclo e RG média diária em ambas as safras foram muito similares, com médias de 2.635 MJ m^{-2} e $23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ respectivamente. Por isso, e considerando que o cultivar Puitá INTA tem na Região duas datas principais de semeadura (meados de outubro e meados de novembro), o experimento pode ser considerado representativo das condições regionais.

Tabela 4 - Radiação global (RG) média mensal nas safras 2011-12 e 2012-13, em San Javier, Santa Fe, Argentina

Mês	RG (MJ m ⁻² mes ⁻¹)	
	Safr 2011-12	Safr 2011-12
Outubro	572	563
Novembro	777	758
Dezembro	838	771
Janeiro	816	832
Fevereiro	612	612
Março (*)	384	206

Nota: * No mês de março utilizaram-se somente dados correspondentes aos dias com cultura para o cálculo de UR, RG e PP.

Figura 19 - Radiação Global (RG) diária nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina

Tabela 5 - Radiação Global (RG) acumulada nos estádios: I, desde emergência até diferenciação da panícula; II, desde diferenciação até floração e III, desde floração até maturidade fisiológica, nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina

safr	RG (MJ m ⁻²)			
	Estádios ontogênicos			Total
	Estádio I	Estádio II	Estádio III	
2011-12	1487	688	423	2598
2012-13	1370	687	614	2671

4.1.3 Ventos

A variabilidade diária da velocidade de vento (V_v) média no ciclo da cultura, em ambas as safras, foi elevada, ocorrendo desde momentos sem ventos até velocidades de 5 m s^{-1} , conforme mostra a Figura 20. Na mesma, foram plotadas retas para representar a tendência do vento, observando-se claramente que diminui desde o início da safra em outubro até o final da safra em março.

Calculando os valores de V_v média diária para os meses do ciclo da cultura, obtêm-se os mesmos resultados. Além disso, pode ser observado que a safra 2011-12 teve maiores V_v em quase todos os meses, particularmente em janeiro (Tabela 6). Na irrigação por aspersão, o vento é um dos principais fatores a considerar para o espaçamento entre aspersores. Valores médios diários de V_v até 2 m s^{-1} são adequados para o uso deste método, entre 2 e 4 m s^{-1} deve-se sobrepor mais as áreas molhadas pelos aspersores, e já quando V_v é maior que 4 m s^{-1} não é recomendada sua aplicação (TARJUELO, 2005).

A análise dos dados diários da V_v indica que os meses de outubro e novembro são os que apresentaram V_v média diária maior que 4 m s^{-1} em ambas as safras, no entanto nos meses com plena irrigação (dezembro a fevereiro), na maioria dos dias ocorreram valores menores que 2 m s^{-1} (Tabela 6). De acordo com o anterior, em San Javier a aspersão poderia ser utilizada se só fossem consideradas as condições do vento.

Figura 20 - Velocidades de vento (V_v , m s^{-1}) médias diárias nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina

Tabela 6 - Velocidade de vento (V_v , m s^{-1}) média diária e N° de dias com $V_v < 2 \text{ m s}^{-1}$, $2 < V_v < 4 \text{ m s}^{-1}$ e $V_v > 4 \text{ m s}^{-1}$ para os meses de outubro a março nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Santa Fe, Argentina

	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Safr 2011-12						
V_v Média (m s^{-1})	2,3	2,0	1,9	1,5	1,7	1,1
N° de dias						
$V_v < 2 \text{ m s}^{-1}$	12	16	21	24	18	17
$2 < V_v < 4 \text{ m s}^{-1}$	17	11	8	7	10	3
$V_v > 4 \text{ m s}^{-1}$	2	2	2	0	0	0
Safr 2012-13						
V_v Média (m s^{-1})	2,6	1,7	1,5	0,8	1,1	1,1
N° de dias						
$V_v < 2 \text{ m s}^{-1}$	9	20	23	30	25	10
$2 < V_v < 4 \text{ m s}^{-1}$	17	9	8	1	3	1
$V_v > 4 \text{ m s}^{-1}$	5	1	0	0	0	0

4.2 Diagnóstico edáfico

Os dois solos são diferentes quanto a propriedades químicas, físicas e hidrológicas. No primeiro solo, foram analisadas considerando os níveis ótimos de macronutrientes necessários para obter uma produtividade em variedades ANA de arroz irrigado próxima a 10 Mg ha^{-1} , não obstante eles terem sido obtidos na região de Entre Ríos, com solos da ordem Vertissolos (QUINTERO e FIGUEROA, 2008).

No solo PlaNa (safra 2011-12), os valores de MO, CEE, pH, Mg^{2+} e K^+ obtidos na camada superficial são considerados ótimos para uma alta produtividade de arroz, no entanto, o Ca^{2+} e a PST estariam no limite inferior (Tabela 7). Já na camada subsuperficial, mais variáveis tiveram valores restritivos, fundamentalmente a PST, que apresentou o dobro do valor limite. A abundância do sódio é o que caracteriza estes solos, além de apresentar o pH acima do limiar ótimo (Tabela 7). O Ca^{2+} e Mg^{2+} ficaram próximos ao limite inferior, indicando provável carência destes elementos; no entanto, a disponibilidade do K^+ foi adequada. Os níveis de P em ambas as camadas ficaram próximos aos valores encontrados em solos de Entre Ríos (QUINTERO, 2009) e respondem à adubação feita ano a ano pelos produtores. A CTC deste solo foi baixa, próxima a $9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para ambas as camadas, devido às condições texturais que o caracterizam, isto é, baixo teor de argila (Tabela 8).

Considerando os valores obtidos no mesmo lote agrícola no ano 2000, e comparando com os obtidos neste trabalho, as principais diferenças foram os conteúdos de MO (25% maior), a relação CO/Nt (22% superior), Na^+ (46% maior) e K^+ (45% superior); no entanto, a quantidade de P foi a metade em comparação

àquele ano. Em relação a este elemento, provavelmente as adubações anuais permitiram seu incremento até estabilizar-se ao redor de 10 ppm.

A relação CO/N teve tendência a diminuir na última década, devido ao menor teor de MO antes que o Nt (Tabela 7), indicando estabilização na mineralização da MO, isto é, o aporte de N em cada ciclo de arroz.

Tabela 7 - Valores de matéria e carbono orgânico (MO e CO), nitrogênio total (Nt%), Fósforo (P), pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Porcentagem de Sódio Trocável (PST), saturação de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} teores de areia, argila e silte para diferentes camadas do solo PlaNa

Variável	Unidade	Camadas			Níveis ótimos para alta produtividade de arroz (2)
		0-0,11 m	0,11-0,25 m	0-0,2 m (1)	
MO	(%)	3,10	1,50	3,86	2,5- 8
CO	(%)	1,80	0,87	2,24	-
Nt	(%)	0,166	0,097	0,170	-
CO/N	-	11	9	13	-
P	(ppm)	10	7	5	-
pH	-	6,1	7,2	6,0	4,8-6,5
CEe	(dS m ⁻¹)	0,9	0,6	0,3	< 1,5
Ca	(cmol _c kg ⁻¹)	4,8	4,3	5,1	5-30
Mg	(cmol _c kg ⁻¹)	5,7	1,1	0,9	1,5-6,5
Na	(cmol _c kg ⁻¹)	0,8	1,4	1,2	-
K	(cmol _c kg ⁻¹)	0,4	0,3	0,6	0,3-1,2
CIC	(cmol _c kg ⁻¹)	9,2	8,8	10,8	-
PST	(%)	8,7	15,9	11	<8
Saturação Ca^{2+}	(%)	52	49	47	30-80
Saturação Mg^{2+}	(%)	62	13	8	8-22
Saturação K^{+}	(%)	4,3	3,4	5,4	1-4

Nota - (1) Análise de solo feita por produtor agrícola no ano 2000 no Laboratório da Bolsa de Comercio de Santa Fe.

(2) Segundo Quintero e Figueroa (2008)

O solo PlaNa apresenta nas camadas analisadas altos teores de areia, maior na superfície (0-0,25 m); no entanto, a porcentagem de argila e silte são similares na mesma camada. A textura muda a partir de 0,25 m, devido ao maior teor de argila. (Tabela 8).

Tabela 8 - Percentagem de areia, argila e silte e classificação textural para diferentes camadas do solo PlaNa

granulometria	Camadas			
	0-0,11 m	0,11-0,25 m	0,25-0,4 m	0,4-0,6 m
Areia (%)	46,9	45,5	33,5	37,9
Argila (%)	29,5	25,2	38,7	34,3
Silte (%)	23,6	29,3	27,9	27,9
Textura (1)	Franco-argilo-arenosa	Franco	Franco-argilosa	Franco-argilosa

Nota - (1) Segundo triângulo textural do Soil Survey Manual, DA, EEUU, 1993 e Lemos e Santos (2002)

O solo RegAb não tem restrições para a cultura do arroz de alta produtividade na camada superficial (Ap, 0 a 0,19 m, Tabela 9). Os teores de Na^+ são baixos, ao contrário do PlaNa. Quanto a MO, estaria levemente abaixo do limite recomendado, mas será discutido se isso pode ser restritivo para alcançar máximas produtividades. Considerando as duas camadas (Ap e A2) foi feita uma análise estatística para avaliar diferenças entre elas (Tabela 9) e entre blocos. Somente MO e pH foram diferentes entre as duas camadas; no entanto, o resto das variáveis não tiveram diferenças significativas. Em relação aos blocos, somente P teve diferenças significativas ($p \leq 0,05$), com magnitudes muito altas e maiores aos valores médios do agro-ecossistema Vz. Portanto, a movimentação de terra realizada na sistematização do lote não teve influência nas variáveis do solo com maior impacto na cultura, especialmente Nt. No caso do P, ainda com diferenças significativas, os valores mínimos resultaram adequados para fornecer às necessidades da cultura. A relação CO/N nas camadas superficial e sub-superficial foram muito similares aos do PlaNa, ainda que com menores teor de MO e Nt (Tabela 9).

Outra diferença com PlaNa foi a granulometria, devido ao predomínio do silte em todas as camadas, que resultou quase o dobro que aquele, e menores teores de areia em relação ao PlaNa (Tabela 10). Devido a este agro-ecossistema ter como material de origem areias grossas das dunas modeladas pelo vento, Além disso, RegAB Indicou um limite nítido entre a camada superior (0 - 0,4 m), de tipo franco-siltosa com relação à inferior, franco-argilo-siltosa (Tabela 10). Nesta última camada, a porcentagem de areia de só 20% indica o limite entre a textura franco-siltosa e franco-argilo-siltosa (LEMOS e SANTOS, 2002). Essa condição abrupta é a que caracteriza este solo (PILATTI et al., 2003) e deve-se aos diferentes meios de transporte dos sedimentos. A areia foi depositada pelo rio Paraná em sucessivos

processos de enchentes sob um solo prévio transportado pelos ventos, situação própria do loess pampiano (POCOVI, 1947; INTA-MAG, 1981).

Tabela 9 - Matéria Orgânica (MO) e Carbono Orgânico (CO), Nitrogênio total (Nt%), Fósforo (P), pH, Condutividade Elétrica do extrato de saturação (CEe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Porcentagem de Sódio Trocável (PST), Saturação de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} para diferentes camadas do solo RegAb

Variável	Unidade	Ap 0 - 0,19m	Desvio padrão	A2 0,19 - 0,4m	Desvio padrão	Níveis ótimos para alta produtividade de arroz (1)
MO	%	2,23 a	0,15	1,13 b	0,06	2,5- 8
CO	%	1,31 a	0,15	0,66 b	0,06	-
Nt	%	0,12 a	0,01	0,08 a	0,01	-
CO/N	-	11	0,79	8	0,84	-
P	ppm	50,00 a	24,52	46,67a	24,11	-
pH	-	6,07 a	0,06	6,23 b	0,06	4,8-6,5
CEe	(dS/m)	0,30 a	0,00	0,23 a	0,06	< 1,5
Ca	(cmol _c kg ⁻¹)	6,17 a	0,46	6,97 a	0,60	5-30
Mg	(cmol _c kg ⁻¹)	1,77 a	0,35	1,47 a	0,31	1,5-6,5
Na	(cmol _c kg ⁻¹)	0,53 a	0,06	0,53 a	0,06	-
K	(cmol _c kg ⁻¹)	0,67 a	0,06	0,57 a	0,15	0,3-1,2
CIC	(cmol _c kg ⁻¹)	15,97 a	2,50	15,30 a	3,16	-
PST	%	3,4 a	0,33	3,6 a	0,85	<8
Saturação Ca^{2+}	%	39,0	4,33	46,3	6,46	-
Saturação Mg^{2+}	%	11,5	4,04	9,9	3,42	-
Saturação K^{+}	%	4,3	0,84	3,8	1,38	-

Nota - (1) segundo Quintero e Figueroa (2008)

Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre camadas segundo LSD (Fisher).

Nas Figuras 21 e 22 são apresentados ambos os solos no momento da extração das amostras para densidade e CRH, identificando as camadas representativas.

Figura 21 – Solo PlaNa no momento de extração de amostras

Figura 22 – Solo RegAb no momento de extração de amostras

Tabela 10 - Percentagem de areia, argila e silte e classes texturais para diferentes camadas do solo RegAb

granulometria	Camadas			
	0-0,1 m	0,1-0,19 m	0,19-0,4 m	0,4-0,6 m
Areia (%)	27,2	24,4	28,1	20,1
Argila (%)	19,4	22,2	20,6	33,1
Silte (%)	53,4	53,4	51,3	46,8
Textura (1)	Franco-siltosa	Franco-siltosa	Franco-siltosa	Franco-argilo-siltosa

Nota- (1) Segundo triângulo textural do Soil Survey Manual, DA, EEUU, 1993 e Lemos e Santos (2002)

4.3 Disponibilidade de macronutrientes no solo

As quantidades de N, P e K aportadas foram distintas para cada solo, devido tanto às diferenças nos conteúdos desses elementos, quanto à densidade e a profundidade considerada. A estimativa do N aportado foi similar em ambos os solos, só que a profundidade da camada considerada em RegAb foi 60% maior que no PlaNa (Tabela 11). A porcentagem aportada pela camada superior foi levemente maior que na inferior do PlaNa e, embora esta camada tenha menor conteúdo de Nt, tem maior espessura. No entanto, no RegAB as diferenças de Nnat entre a superior e a inferior foram ainda maiores, mas com espessuras semelhantes. Isto se deve aos maiores teores de Nt na camada superior.

Baseado em um requerimento de N de 180 kg ha⁻¹ para produzir 10 Mg ha⁻¹ de arroz em casca (14% umidade) para a mesma variedade obtida por Quintero (2009), o aporte de ambos os solos ($\cong$ 125 kg ha⁻¹, Tabela 11) representaria quase 70% de todo o N requerido. Nesse sentido, a adubação com N na safra 2011-12 foi de 97,2 kg ha⁻¹, 62% maior que a necessária se a estimativa de Nnat fosse adequada; no entanto, na safra 2012-13 os aportes totais de N para os tratamentos T1 e T2 foram 50 e 87 kg ha⁻¹ respectivamente, mais ajustados às quantidades de N necessárias.

Tabela 11 - Estimativa do Nitrogênio nativo (Nnat), Nitrogênio mineralizável (Nmin), Nitrogênio de nitratos (NO_{3S}), Nitrogênio ativo (Nact) e Nitrogênio total (Nt), para diferentes camadas e densidades (ρ_s) dos solos PlaNa e RegAb

Solo	Camada (m)	Nt (kg ha ⁻¹)	Nact (kg ha ⁻¹)	NO _{3S} (kg ha ⁻¹)	Nmin (kg ha ⁻¹)	Nnat (kg ha ⁻¹)	% Nnat x camada
PlaNa	0-0,11	2922	204,5	12,3	52,4	64,7	53
	0,11-0,25	2037	142,6	14,7	41,7	56,4	47
	Total	-	-	-	-	121,1	-
RegAb	0-0,19	3312	231,8	19,3	52,2	71,5	56

0,19-0,4	2268	158,8	19,6	37,3	56,9	44
Total	-	-	-	-	128,4	-

Outra estimativa de aplicação da quantidade de nitrogênio necessária considera o intervalo de MO de ambos os solos e a variedade de arroz (QUINTERO e FIGUEROA, 2008), resultam para Puitá-INTA em torno de 80 kg N ha⁻¹, portanto, as duas metodologias indicam um requerimento total de 75 a 80 kg N ha⁻¹. A oportunidade e quantidade de aplicação dos adubos serão analisadas quando forem apresentados os resultados de absorção de nutrientes pelas plantas.

Com relação aos elementos P e K⁺, para obter a produtividade já mencionada (10 Mg ha⁻¹ de arroz em casca), seriam necessários 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ respectivamente. Ambos os solos têm capacidade de entregar essas quantidades em suas camadas superficiais sem restrições (Tabela 12), mas o RegAb forneceu maior quantidade de ambos os elementos em relação ao PlaNa, em especial P. Isto deve-se tanto ao material de origem próprio de cada solo (aluvial), como as adubações feitas nas culturas antecessores.

As aplicações de 100 e 70 kg ha⁻¹ de adubo base (NPK= 19-19-19) permitiram adicionar 19 kg ha⁻¹ de P e K⁺ no solo PlaNa e 13,3 kg ha⁻¹ de P e K⁺ no solo RegAb. Neste último poderia não ter sido feitas aplicações de P e K em fileira no momento da semeadura, mas é prática comum dos produtores.

Tabela 12 - Estimativa de Fósforo (P) e Potássio (K), em % e kg ha⁻¹, para diferentes camadas e densidades (ρ_s) dos solos PlaNa e RegAb

Solo	Camada (m)	P (kg ha ⁻¹)	% P x camada	K (kg ha ⁻¹)	% K x camada
PlaNa	0-0,11	17,6	54	275,3	53
	0,11-0,25	14,7	46	246,3	47
	Total	32,3		521,6	
RegAb	0-0,19	138	51	719,8	54
	0,19-0,4	131,6	49	620,8	46
	Total	269,6		1340,6	

Além disso, a disponibilidade de P é maior em condições de solo inundado, tanto por uma difusão mais rápida do elemento até as raízes, como por sua maior solubilidade, devido a uma diluição redutora dos óxidos de ferro, já que imediatamente após a drenagem do solo, foi determinada uma diminuição do P disponível (QUINTERO et al, 2007).

No lote agrícola (PlaNa), no entanto, pode ter havido uma perda progressiva de K^+ ao longo do tempo (desde 0,6 para 0,3-0,4 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), devido ao manejo contínuo de arroz, de modo que a adubação anual com esse elemento pode ter sido não suficiente para repor a extração feita pela cultura.

4.4 Propriedades físicas do solo

4.4.1 Densidade de solo- ρ_s

O lote com solo PlaNa, com arroz sobre arroz e pastagem com gado durante, pelo menos, 15 anos, apresenta nas duas camadas valores de ρ_s muito elevados, indicando compactação do solo (Tabela 13). Nestas condições de elevada compactação, a porosidade total (Pot) foi apenas de 0,39 ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), considerando ρ_p de $2,653 \text{ Mg m}^{-3}$ (PILATTI, GHIBERTO e IMHOFF, 2006), sendo que as raízes das plântulas de arroz devem imergir e crescer até o momento da inundação, com sérios impedimentos em seu crescimento (KOBATA, HOQUE e ADACHI, 2000).

Por outro lado, uma vez alcançada a compactação, com a inundação no solo houve uma forte expansão, fato medido por meio de escalas colocadas no lote, com incremento médio de 1 cm do nível do solo e corroborado a partir da diminuição da densidade na camada superficial (Tabela 13). A medição imediatamente após a colheita, com solo ainda saturado, significou uma diminuição de ρ_s de 20%, no entanto um mês após as densidades não mudaram, fundamentalmente porque a umidade de solo também não variou, obtendo-se, em média, $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas áreas cobertas com plástico. Considerando o valor da Pot nesta data equivalente a θ_s ($0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), aquele valor representaria θ_{cc} para condições não compactadas. No entanto, para o momento prévio a semeadura e com alta compactação, o valor médio de Pot foi 23,6% menor.

Já no solo RegAb, as densidades nas camadas superficiais no período da semeadura foram muito menores ao PlaNa e não ocorreu expansão durante o ciclo, exceto na medição de infiltração com o método dos duplo anéis. Após da colheita a camada superficial foi dividida em dois (0-0,1 e 0,1-0,2 m) para avaliar possíveis efeitos da irrigação, resultando em valores semelhantes (Tabela 13). Maiores diferenças entre datas foram determinadas nas camadas 0,19-0,4 m e 0,4-0,6, mas isso só se explicaria na própria variabilidade do solo. Devido ao teor de argila nas

camadas superficiais de ambos os solos serem similares, e que o manejo da água também foi inundação, as diferenças seriam pelo conteúdo do Na^+ e a composição mineralógica da argila.

Tabela 13 - Densidades do solo (ρ_s) e porosidade total (Pot) nas camadas superficiais do solo PlaNa e RegAb para diferentes datas durante as safras 2011-12 e 2012-13

PlaNa					RegAb				
Data	Camada (m)	ρ_s (Mg m^{-3})	CV (%)	Pot ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Data	Camada (m)	ρ_s (Mg m^{-3})	CV (%)	Pot ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Mai. 2011	0-0,11	1,36	3,3	0,49	Out.2012	0-0,19	1,38	1,2	0,48
	0,11-0,25	1,84	1,4	0,31		0,19-0,4	1,40	0,8	0,46
Nov. 2011		1,63	2,8	0,39		0,4-0,6	1,56	1,3	0,40
Mar. 2012	0-0,11 (1)	1,31	4,1	0,51		0-0,1	1,44	4,2	0,46
Abr. 2012		1,31	3,0	0,51	Fev. 2013	0,1-0,19	1,58	2,9	0,40
						0,19-0,4	1,65	6,1	0,37
						0,4-0,6	1,64	3,3	0,37

Nota – (1) No solo PlaNa foi medida somente a camada superficial para estimativa de câmbios na densidade

4.4.2 Curva de retenção hídrica-CRH

Os resultados de θ_s da CRH para o solo PlaNa não foram coincidentes com nenhuma das determinação de Pot obtidas a partir de dados de densidade, resultando menor na camada superficial e maior na sub-superficial (Tabela 14). O primeiro caso indicaria dificuldades para saturar as amostras em laboratório, embora haja sido o processo muito lento e tomasse vários dias em completar. Isto poderia se dever à expansão do volume causado pelo teor de Na^+ ou à composição mineralógica da argila. Também é de supor que ocorresse no campo, com possibilidades de ficar ar aprisionado nos poros, por exemplo, com a aspersão e ainda mais com saturação rápida no caso de inundação.

No entanto, considerando o valor de $0,45 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ mencionado anteriormente como próprio de θ_{cc} , Ψ_m resulta $-0,5 \text{ kPa}$ segundo a equação ajustada de Genuchten, para a camada 0-0,11. Mas devido à amostragem para obter CRH ter sido feita num período de transição entre expansão e adensamento do solo, este valor de Ψ_m não seria apropriado para utilizar no manejo de aspersão para solo não saturado. Por outro lado, considerando como limite da macroporosidade e, portanto água de retenção, um raio de poro de $15 \mu\text{m}$ (equivalente a -10 kPa), os valores de θ nas camadas superficial e sub-superficial do solo PlaNa resultaram em $0,4$ e $0,34 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente (Figura 23).

A CRH da camada sub-superficial do PlaNa foi na qual se colocaram os tensiômetros para o manejo da irrigação em AS. No intervalo entre 0 e -100 kPa houve menor disponibilidade de água que a camada superior (Figura 23), indicando um processo de adensamento ainda maior.

Tabela 14 - Parâmetros da curva de retenção de Genuchten para as camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 m do solo PlaNa e 0-0,1; 0,1-0,19; 0,19-0,4 e 0,4-0,6 m do solo RegAb

Solo	Camada (m)	α	θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	n
PlaNa	0-0,11	0,070	0,011	0,450	1,315
	0,11-0,25	0,087	0,001	0,366	1,170
	0-0,1	0,089	0	0,456	1,260
RegAb	0,1-0,19	0,039	0	0,391	1,311
	0,19-0,4	0,029	0	0,357	1,309
	0,4-0,6	0,020	0	0,389	1,366
(1)	0-0,15	0,255	0,069	0,426	1,223

Nota - (1) Valores médios obtidos por Filippi e Marano (2011) em um lote perto à área experimental (25 km) e com predomínio de solo PlaNa

Figura 23 - Curva de retenção da camada superficial (0 - 0,11 m) e sub-superficial (0,11-0,25) do solo PlaNa, safra 2011-12

O maior limitante da utilização da CRH no solo PlaNa foi a variabilidade de ρ_s em função de θ , o que repercute nos cálculos da lâmina de irrigação líquida (Eq. 22) necessária para aplicar em aspersão. No solo RegAb também houve diferenças entre θ_s e Pot na camada superficial, ainda que menores que no PlaNa, indicando

dificuldades na saturação. Devido aos baixos teores de Na^+ , a expansão seria principalmente devido à composição mineralógica da argila.

Considerando igual limite da macroporosidade que no PlaNa (-10 kPa), o valor de θ na camada 0-0,1 do solo RegAb também foi $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 24), ainda que o teor de areia neste solo fosse quase à metade do PlaNa. As camadas inferiores tiveram menor disponibilidade de água devido ao maior adensamento do solo.

Figura 24 - Curva de retenção das camadas 0 - 0,11; 0,1-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m do solo RegAb, safra 2012-13

Os parâmetros obtidos com a equação de Genuchten permitiram um excelente ajuste com os valores observados, para ambas as camadas do PlaNa (Figura 25) e todas as camadas do RegAb (Figura 26).

Figura 25 - Valores médios de umidade de solo observados e ajustados segundo equação de retenção da camada superficial (0-0,11 m) do solo PlaNa, safra 2011-12

Figura 26 - Valores médios de umidade de solo observados e ajustados segundo equação de retenção da camada superficial (0-0,11 m) do solo PlaNa, safra 2011-12

4.4.3 Resistência à Penetração

Devido à maior proporção de raízes do arroz explorarem até 0,2-0,3 m de profundidade (YOSHIDA, 1981; FAGERIA, 2007; QUINTERO 2009), é importante conhecer a impedância do solo nessas camadas. As camadas sub-superficiais de ambos os solos (0,11-0,25 no PlaNa e 0,1-0,19 no RegAb) tiveram maiores RP que as respectivas camadas superficiais, para valores de θ até $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figuras 27 e 28), condição prévia ao início da irrigação. Em particular o PlaNa apresentou magnitudes de RP de até 7,4 MPa (θ igual a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) nessa camada, que junto com os altos valores de densidade, significaria severos problemas para o crescimento normal das raízes e diminuição da produtividade (BEUTLER et al., 2004). Esses autores reportaram perdas de até 66% em arroz de sequeiro quando RP, determinado com θ a -10 kPa atingiu 2,73 MPa.

Embora o solo RegAb tivesse menor RP que o PlaNa na camada sub-superficial e também prévio a inundação (θ igual a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, Figura 28), foi muito superior ao valor antes mencionado, e, portanto também pode ter restringido o crescimento das raízes. Já em pleno período da irrigação, houve aumento do conteúdo de água de todos os tratamentos, resultando em valores próximos a capacidade de campo, com θ em torno de $0,35\text{-}0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para -10 kPa nas camadas superficiais de ambos os solos, ou saturados, isto é, $\text{RP} < 1 \text{ MPa}$ (Figuras 27 e 28).

Figura 27- Resistência à Penetração (RP) obtida em laboratório para diferentes conteúdos de água no solo nas camadas: 0-0,11 e 0,11-0,25 m para solo PlaNa, safra 2011-12

Figura 28 - Resistência à Penetração (RP) obtida em laboratório para diferentes conteúdos de água no solo nas camadas: 0-0,1; 0,1-0,19; 0,19-0,4 e 0,4-0,6 m para solo RegAb, safra 2012-13

4.4.4 Infiltração e condutividade hidráulica

O teste de infiltração com anéis duplos na safra 2011-12 foi feito anteriormente ao início da irrigação, resultando a eq. (61) de Kostiakov:

$$\begin{aligned} I_{cum} &= 0,97 \times t^{0,35} \\ VI &= 20,37 \times t^{-0,65} \end{aligned} \quad (61)$$

No entanto, não foi possível realizar o teste com anéis duplos na safra 2012-13 (RegAB) devido ao solo no interior do anéis expandir-se e aumentou seu volume, selando os poros e impedindo que a água infiltrasse (Figura 29). Como alternativa foi avaliada a infiltração nas próprias parcelas submetidas a manejo com inundação, uma vez começada à irrigação. O procedimento foi aplicar, no final da tarde, uma lâmina de água e ler as réguas instaladas em cada parcela e, no amanhecer do dia seguinte, voltar a ler as réguas, resultando assim a diferença entre leituras a lâmina média infiltrada (Tabela 15). As diferenças entre os valores de VIB devem-se às diferentes metodologias utilizadas, sendo que a medição na própria parcela resultou em valores mais confiável.

Quanto às medidas com infiltrômetro de tensão, elas resultaram em um alto CV, produto da variabilidade espacial do solo (Tabela 15). A K_{hs} do solo RegAb resultou no dobro da K_{hs} do solo PlaNa, em concordância com as maiores perdas por percolação profunda determinadas naquele solo. Com as demais tensões foram determinadas as percentagens de fluxo segundo diferentes raios de poros (Figura 30) o que permitiu inferir que 70% do fluxo no solo RegAb movimenta-se por poros cujos raios são maiores a 1.000 μm e 53% no caso do PlaNa.

Tabela 15 - Condutividade hidráulica nas tensões de 3 cm (K_{h3}), 1,5 cm ($K_{h1,5}$) e saturada (K_{hs}), velocidade de infiltração básica (VIB) e coeficiente de variação (CV) para o solos PlaNa e RegAb

Solo	K_{h3} (cm h ⁻¹)	$K_{h1,5}$ (cm h ⁻¹)	K_{hs} (cm h ⁻¹)	VIB (cm h ⁻¹)	VIB (mm d ⁻¹)
PlaNa	0,14	0,5	1,06	0,42 (1)	100,8
CV (%)	13	35	32	25	
RegAb	0,43	0,68	2,33	0,12 (2)	28,8
CV (%)	32	34	31	25	

Nota – (1) Estimada com equação de Grassi (1987) a partir de ensaio com duplo anéis

(2) Determinada nas parcelas com inundação

Figura 29 – Teste de infiltração com duplos anéis no solo RegAb (A). B foto permite observar o solo expandido que ficou no interior do anel após que este fosse removido

Figura 30 - Percentagem de fluxo (%) segundo diferentes raios de poros para ambos os solos, PlaNa e RegAb, obtidos a partir das condutividades hidráulicas nas tensões 0, 1,5 e 3 cm

4.4.5 Lençol freático

A variação na profundidade do lençol freático no solo PlaNa, antes e após a inundação foi muito pequena, em torno de 0,5 m (Figura 31), portanto a água percolada durante a irrigação que alcançou o lençol foi menor a considerar a VIB diária acumulada durante o ciclo da irrigação. Além disso, quando a irrigação

culminou, o lençol novamente atingiu o nível inicial (Figura 31). As variações observadas no lençol foram devidas ao conjunto dos lotes adjacentes ao experimento, antes que as parcelas experimentais.

Figura 31– Variação profundidade lençol freático solo PlaNa, safra 2011-12, San Javier, Argentina

Da observação da Figura 31 surge que a profundidade do lençol esteve sempre abaixo de 0,4 m, que corresponde à camada argilosa do solo PlaNa, embora a camada superficial estivesse saturada. Isto poderia dever-se a ter aquela camada ar aprisionado que não permitiu saturar todos os poros e assim não se poder transmitir a pressão hidrostática da camada superior. Isto foi corroborado com piezômetros instalados até 0,4 m, os quais não registraram água em seu interior.

Na safra seguinte, no agro-ecossistema Tç, a percolação foi maior e isso se refletiu na ascensão rápida do lençol (Figura 32). Do mesmo modo que na safra anterior, o conjunto dos lotes adjacentes ao experimento foram responsáveis pelo aumento do nível do lençol freático, antes que as parcelas experimentais. O descenso registrado na semana do 12-12-12 (Figura 32) deveu-se a uma saída temporária da estação de bombeamento que interrompeu a irrigação. Como o rio San Javier está perto do local de medição do lençol, e nessa data seu nível era menor ao do lençol, isso significou um gradiente hidráulico alto que gerou fluxo subterrâneo em direção ao Rio. A restauração da irrigação permitiu novamente que houvesse percolação e os níveis ascenderam. Porém, eles estiveram sempre abaixo de 0,7 m, possivelmente devido a ser essa a altura máxima de recarga que permitiria o gradiente hidráulico gerado com o Rio. Isto é, com o nível do Rio nessa data, a K_h do estrato permeável e a taxa de percolação, haveria uma profundidade mínima do lençol de 0,7 m.

Figura 32– Variação profundidade lençol freático solo RegAb, safra 2012-13, San Javier, Argentina

4.5 Aspersão

4.5.1 Seleção dos emissores

Foram utilizados dois tipos de aspersores diferentes, um em cada safra. Numa primeira etapa foi testado no Laboratório de Hidráulica da ESALQ emissores modelo i-Wob da empresa Senninger Irrigation Inc., que são utilizados em pivô central. Testaram-se dois bocais (cinza, de 3,57 mm e dourado, de 2,38 mm) e três pressões (70, 100 e 150 kPa), na posição recomendada pelo fabricante (invertido). As vazões (média de quatro repetições) feitas com medidor eletromagnético resultaram em $0,453 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $0,549 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $0,677 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Posteriormente foram feitos ensaios a campo com o bocal cinza, com duas pressões (104 e 160 kPa), espaçamento de 6 x 6 (m), altura de 1,5 m e coletores cada 0,5 m. As pluviometrias resultantes foram $12,6 \text{ mm h}^{-1}$ e $15,6 \text{ mm h}^{-1}$, com Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) de 81,7 e 87,2% respectivamente. Esses valores foram considerados de bom a muito bom, mas devido à ideia de se instalar os aspersores com o fluxo para acima, também foram feitas provas de perfil de distribuição nessa condição, mas com o i-Wob não obteve resultado adequado, sendo necessária a busca de outro tipo de emissor. Assim foram ensaiados no campo da FCA-UNL emissores tipo spray de 360° para jardim da empresa Hunter (Figura 33), modelos 12A, 15A e 17A nas pressões 105, 140 e 200 kPa, altura de 1,5 m e espaçamento de 5x5 m. A melhor combinação de CUC e de pluviometria resultou o modelo 17A, com 23 mm h^{-1} e pressão de 140 kPa. Não foram avaliadas as vazões por não ter

disponível um medidor de precisão, mas foi estimada como o produto da pluviometria x área, resultando para o emissor selecionado $0,585 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Aspersores de menor pluviometria não foram selecionadas porque apresentam gotas mais finas e mais susceptíveis à deriva por vento.

Na safra 2011-12, foram colocados quatro emissores no centro de cada parcela, a 1,5 m de altura (WESTCOT e VINES, 1986) e 5 x 5 m de espaçamento, atingindo uma área de 25 m^2 (um quarto da área total da parcela). A ideia de colocar os emissores a 1,5 m esteve baseada na altura da planta (em torno de 1m) e ao modo de aplicar a água.

Para a estimativa da Lmc foram colocados 4 coletores a 0,5 m de altura e distribuídos entre os emissores. A utilização da EAp como indicador de eficiência para a obtenção da LiL (eq. 10) foi devida às pequenas dimensões das parcelas.

As aplicações foram feitas apenas no amanhecer, 06:30, quando os ventos tem menor velocidade. Os valores de EAp obtidos na safra 2011-12 foram, em média, de 0,7, mas com variações entre 0,4 a 0,9. Os aspersores de um mesmo bloco funcionaram em simultâneo, e se alguma parcela necessitava tempos diferentes, fechavam-se aquelas que já tinham aplicada a lâmina requerida mediante válvulas esféricas. Também foram avaliadas as pressões com manômetros colocados nos extremos das tubulações.

Na safra 2012-13, houve modificações. Objetivou-se aumentar EAp mediante gotas de maior tamanho, para assim reduzir a influência dos ventos. Além disso, os aspersores anteriormente instalados na área central das parcelas foram colocados nos cantos, para atingir toda a parcela. Para isso foi selecionado um aspersor giratório de impacto, de maior alcance que os difusores, com dispositivo que permita seu funcionamento setorizado (90°). Essa foi a principal questão a resolver, devido a poucos modelos de aspersores têm dispositivos para setorizar com ângulo variável. Com tudo, também não deveriam ter alta pluviometria, embora o solo tenha maior VI.

Após a busca do aspersor apropriado, foi selecionado o modelo 427 B GAG da marca NAANDANJAIN (Figura 34), jato único, que para o bocal de 3 mm (vermelho) e a pressão de trabalho de 200 kPa, tem vazão de $0,51 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e alcance de 11,5 m. Segundo a disposição e vazão dos aspersores, a média de PI teórica foi $24,9 \text{ mm h}^{-1}$. Uma característica importante do aspersor selecionado foi um defletor

que permitia variar a distribuição do jato, para assim regular as gotas segundo os ventos.

Outra alteração foi à altura do porta-aspersor, mudando de 1,5 a 0,5 m. Essa menor altura permitiu melhorar notavelmente a eficiência porque os ventos incidiram menos nas gotas, evitando deriva para fora das parcelas. Devido à altura das plantas alcançarem um metro, o principal cuidado foi que nas imediações dos aspersores não houvesse plantas que obstruem o jato ou impedisse seu giro.

As avaliações feitas com os coletores ao início do experimento indicaram uma EAp média de 0,9, notavelmente maior que na safra anterior.

Figura 33 – Aspersores montados no centro da parcela, altura porta-aspersor 1,5 m com ângulo de rotação de 360°, safra 2011-12

Figura 34 – Aspersores montados no extremo da parcela, altura porta-aspersor 0,5 m com ângulo de rotação de 90°, safra 2012-13

4.5.2 Manejo

Para obter a L_{il} segundo eq. (28) e considerando a E_{sp} em 0,20 m, a água que pode ser armazenada entre θ_{cc} e saturação nesta camada seria em torno de 24 mm, segundo a CRH do solo PlaNa. Estes valores resultaram muito elevados e significariam intervalos de irrigação quase semanais; porquanto, em vez de aplicar até a saturação, considerou-se o conteúdo de água a -10 kPa, e assim a lâmina diminuiu até valores em torno de 9 mm. Porém, ao início da irrigação foram feitas aplicações com maiores doses para atingir uma profundidade de até 0,4 m.

Com este manejo, na primeira etapa da irrigação as aplicações foram feitas cada dois ou três dias, em função do consumo das plantas e os tensiômetros funcionaram sem problemas pela umidade armazenada ao início. Já no estágio reprodutivo, após de R1, as frequências aumentaram até fazerem-se diárias no

momento crítico (enchimento de grãos) e, embora as aplicações fossem projetadas para atingir θ_{cc} , segundo leituras feitas nos tensiômetros antes de cada irrigação, o solo esteve abaixo desse conteúdo de água. Maiores doses não foram factíveis de aplicar porque ocorria escoamento, porquanto em alguns dias foram feitas duas aplicações, objetivando que a água infiltrasse até essa profundidade. Essa situação, provavelmente, favoreceu uma maior E_v de água do solo, aspecto que não foi avaliado nesta Tese.

O tempo máximo de aplicação da água para que não ocorra escoamento foi de 20 min, devido a se ultrapassar esse valor ocorria escoamento superficial. Pequenos ajustes a este tempo foram feitos para considerar a variabilidade nos tamanhos de cada parcela, e assim aplicar a mesma Lib em cada uma. Os valores médios de Q (eq. 29) e PI (eq. 30) das aplicações, obtidos em função dos hidrômetros, foram $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e 23 mm h^{-1} respectivamente, no entanto a média das aplicações (Lib) foi de 13,7 mm.

Para o cálculo da Li_L no solo RegAb também foi considerado 0,2 m de Esp e, entre saturação e θ_{cc} , a água que pode ser armazenada nessa camada seria em torno de 9 mm, segundo a CRH. Assim, resultou idêntico valor que a safra anterior, só que agora não houve problemas de infiltração da água. A média de Q e PI das aplicações, também obtidas em função dos hidrômetros, foram $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e 24 mm h^{-1} respectivamente, muito semelhantes aos valores teóricos; no entanto, a média da Lib foi de 12,6 mm para um tempo de aplicação de 30 min. A modo de verificação, foram medidos a campo com TDR valores de conteúdo de água na camada superficial em dois momentos: i) imediatamente após de aplicar 12,6 mm às 06:30, e ii) 30 min depois. Na primeira situação observou-se encharcado ao solo, mas sem escoamento, e o conteúdo de água foi de $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no entanto 30 min após já diminuiu até $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Estes valores são quase idênticos aos da CRH para θ_s e -10 kPa respectivamente, verificando então a certeza dos valores obtidos.

4.5.3 Funções de infiltração

Aplicando eq. (22) de Kostiakov no solo PlaNá e com a pluviometria média de 23 mm h^{-1} , o tempo máximo de aplicação da água para que não ocorra escoamento (equivalente a T_p) dever-se-ia em torno de 30 min. No solo RegAb não pôde ser utilizada essa metodologia.

Outro modelo de infiltração mais conceitual -GAML- foi utilizado para corroborar o manejo feito na aspersão. O modelo original supõe só um estágio de infiltração, com condições de empoçamento (*ponded*) na superfície do solo desde o início. Esta situação não sempre ocorre devido à numa primeira fase a taxa de infiltração pode ser maior à chuva, então toda a água infiltra e, conforme a intensidade da precipitação fosse constante e a taxa diminua, ocorrerá escoamento superficial. Às equações originais de Green e Ampt, Mein e Larson (1973) propuseram as de F_s (eq. 23) e T_p (eq.24).

Para sua aplicação na aspersão foram considerados dois supostos: i) a pluviometria dos aspersores (PI) fosse equivalente à intensidade da precipitação (I) e ii) PI fosse maior que a K_{hs} obtida com os infiltrômetros de tensão. Ambos os supostos foram verificados nos solos avaliados.

Quanto ao valor de θ_s , o modelo original supõe que na região acima da frente de umedecimento o solo encontra-se saturado, embora isto não suceda devido ao ar aprisionado nos poros. Cecílio (2002) refere diferentes valores de redução de θ_s , com proporções que variam entre 0,79 até 0,92 θ_s . Ele determinou que 0,86 θ_s foi o melhor resultado, porquanto também foi utilizado no solo PlaNa, além de 0,92 θ_s , correspondente com uma menor redução. Entretanto, o valor de θ_i correspondeu ao manejo feito na aspersão, isto é, o conteúdo de água equivalente prévio a início da irrigação.

A estimativa de Ψ_{mf} resultou a de maior variabilidade. Segundo o modelo original, este parâmetro representa o potencial mátrico na frente de umedecimento, isto é, está relacionado à θ_i segundo a CRH. Os resultados de Ψ_{mf} assim obtidos não foram satisfatórios, porquanto foram utilizados outros critérios. Foi considerado que a frente de umedecimento encontra-se em uma zona entre θ_s e θ_i (CECÍLIO, 2002), considerando como alternativa para o cálculo de Ψ_{mf} ao potencial mátrico correspondente à média de esses conteúdos de água. Uma terceira opção foi utilizar dados apresentados por Rawls et al. (1983) para solos com diferentes texturas e K_{hs} .

Os resultados de F_s segundo três combinações de θ_s e também três de Ψ_{mf} para o solo PlaNa são apresentadas na Tabela 16. Considerando que T_p representa o tempo teórico do começo do empoçamento na superfície do solo e que, segundo as observações no campo, ele foi em torno de 20 min ou 0,33 h, de todas as

combinações, aquela com 0,92 θ_s e Ψ_{mf} de 16 cm foi a mais aproximada. O valor de T_p selecionado foi algo menor ao obtido com Kostiakov (30 min), mas também se teve em conta o F_s selecionado, que foi de 1 cm (Tabela 16). Para sua verificação, se ao valor de 13,7 mm (Lib) fosse aplicada uma EAp de 0,7, a lâmina média que efetivamente alcançou a superfície do solo e infiltrou foi também em torno de 1 cm.

A utilização de θ_s sem diminuição e Ψ_{mf} (θ_i) teve o menor ajuste de T_p (Tabela 16), no entanto o valor do Ψ_{mf} adotado representa um potencial mátrico muito alto, isto é, conteúdos próximos à saturação. Isto tem concordância com Rodrigues (1999), citado por Cecílio, (2002), que recomenda que o valor do Ψ_{mf} seja a metade da pressão de borbulhamento (P_b) obtida da curva de retenção. Do anterior pode se deduzir que Ψ_{mf} , apesar de ser uma variável conceitual do modelo GAML, na prática funciona como um parâmetro de ajuste.

Considerando que a lâmina média infiltrada em cada aplicação foi armazenada até uma profundidade (z , m), segundo eq. (62):

$$z = \frac{F_s}{0,92 \times \theta_s - \theta_i} \quad (62)$$

para o safra 2011-12, o valor de z resultou em 0,13 m, concordante com as observações no campo e leituras dos tensiômetros.

Tabela 16 - Lâmina infiltrada (F_s) segundo diferentes combinações de conteúdo de água no solo em saturação (θ_s) e potencial mátrico (Ψ_{mf}) para o PlaNa, San Javier, Argentina

Variações de θ_s	θ ($m^3 m^{-3}$)	Combinações	F_s (cm)	T_p (h)
1) θ_s	0,45	1 e 4	23,5	10,2
2) 0,92 θ_s	0,41	1 e 5	10,3	4,5
3) 0,86 θ_s	0,39	1 e 6	1,5	0,7
		2 e 4	15,8	6,9
		2 e 5	6,9	3,0
Variações de Ψ_{mf}	$ \Psi_{mf} $ (cm)	2 e 6	1,0	0,4
4) segundo θ_i	250	3 e 4	10,0	4,4
5) média entre θ_s e θ_i	110	3 e 5	4,4	1,9
6) Rawls et al. (1983)	16	3 e 6	0,6	0,3

A partir de F_s e T_p selecionados, para valores de $t \leq T_p$, t foi igual à T_p e $f(t)$ igual a I , no entanto para valores de $t > T_p$, t e $f(t)$ foram obtidas segundo eq. (25) e eq. (26) respectivamente. As curvas de $F(t)$ e $f(t)$ para o solo PlaNa são representadas na Figura 35, na qual pode ser observado que a diminuição da

velocidade de infiltração seria de 30% entre o início e 60 min após de começo da irrigação, no entanto a estabilização da infiltração seria, após de 5 h, em torno de 1,1 cm h⁻¹, que quase triplica a VIB obtida com Grassi (1987) a partir da equação de Kostiakov. Assim, aplicando este valor e considerando as parcelas com Ic, a infiltração média diária seria em torno de 26 cm d⁻¹. De igual modo, se considerar F para um período de 24 h, seu valor seria em torno de 38 cm. Ambas as quantidades de água não infiltraram no campo, porquanto se deduz que as curvas devem ser aplicadas apenas em seu tramo inicial.

Figura 35 – Representação da velocidade de infiltração (f), infiltração acumulada (F) e pluviometria média dos aspersores (PI) em função do tempo (t) para o solo PlaNa. Tp: tempo teórico do começo do empoçamento

Quanto à aplicação do modelo GAML ao solo RegAb, adicionou-se outro valor de Ψ_{mf} para permitir um melhor ajuste, além que não pôde se utilizar o valor de 0,86 θ_s porque resultou menor a θ_i . A melhor combinação resultou 0,92 θ_s e Ψ_{mf} igual a 7 cm, devido a se considerar uma EAp de 0,9, a lâmina média infiltrada após das aplicações foi 1,1 cm, igual ao valor obtido de F_s (Tabela 17). Também foi concordante o T_p de 30 min, já que nesse tempo foi observado no campo um leve empoçamento. Neste solo, o cálculo de T_p com o valor de θ_s e Ψ_{mf} (θ_i) teve o resultado mais afastado da condição de campo e, a diferença do PlaNa, utilizando Ψ_{mf} segundo Rawls et al. (1983) ficou 60% acima do valor real. Com tudo, Ψ_{mf} também foi um parâmetro de ajuste do modelo GAML, com potenciais próximos a saturação.

A profundidade média (z, eq. 62) que alcançou a lâmina infiltrada após de cada aplicação foi de 0,28 m, superando aos tensiômetros instalados a 0,2 m. Isto

explicaria as perdas (Per_{lr}) determinadas neste solo com o manejo feito na safra 2012-13.

Tabela 17 – Lâmina infiltrada (F_s) segundo diferentes combinações de conteúdo de água no solo em saturação (θ_s) e potencialmátrico Ψ_{mf} para o solo RegAb, San Javier, Argentina

Variações de θ_s	θ ($m^3 m^{-3}$)	Combinações	F_s (cm)	T_p (h)
1) θ_s	0,44	1 e 3	133,1	55,5
2) 0,92 θ_s	0,40	1 e 4	79,9	33,3
		1 e 5	14,9	6,2
Variações de Ψ_{mf}	$ \Psi_{mf} $ (cm)	1 e 6	9,3	3,9
3) segundo θ_i	100	2 e 3	16,0	6,7
4) média entre θ_s e θ_i	60	2 e 4	9,6	4,0
5) Rawls et al. (1983)	11,2	2 e 5	1,8	0,7
6) valor de ajuste	7	2 e 6	1,1	0,5

Na Figura 36 pode se observar que a velocidade de infiltração quase não diminui conforme o tempo, indicando uma condição muito estável neste solo. O valor da infiltração após de 90 min resultou em $2,35 \text{ cm h}^{-1}$. Devido a não poder ser feito o teste com anéis duplos, comparando com o teste na própria parcela ($0,12 \text{ cm h}^{-1}$), resultou amplamente superior. Embora este solo tenha muita maior infiltração que o PlaNa, e para um período de 24 horas, a infiltração seria em torno de 56 cm d^{-1} , situação que também não ocorreu no campo. Por isso, a aplicação de GAML dever-se-ia reduzida à primeira parte da curva.

Figura 36 – Representação da velocidade de infiltração (f), infiltração acumulada (F) e pluviometria média dos aspersores (PI) em função do tempo (t) para o solo RegAb. T_p : tempo teórico do começo do empoçamento

4.5.4 Funcionamento dos tensiômetros

Os tensiômetros na primeira safra foram colocados a 0,2 m de profundidade considerando que nessa camada crescem a maior proporção de raízes (YOSHIDA, 1981). Devido ao manejo da aspersão, no momento crítico para o arroz, a frente de umedecimento não atingiu essa profundidade e por isso, após de R1 (mediados de janeiro) a médias das leituras foi de 65 kPa, e também em muitas ocasiões ficaram com ar. Quanto às leituras, elas foram feitas na faixa horária entre 06:30 a 07:30 de modo de evitar o efeito da temperatura do ar sob as leituras dos tensiômetros, que ocorre nas horas mais quentes do dia (entre 09:00 e 17:00) como foi verificado por Camargo (2012). Além disso, os tensiômetros fabricados na ESALQ funcionaram sem problemas.

Na safra seguinte os tensiômetros foram colocados em duas camadas, 0,1 e 0,2 m e o manejo da aspersão permitiu que a frente atingisse e inclusive superasse a maior profundidade. Nesta safra foram colocados transdutores de pressão (Freescale, modelo MPX5100DP) que foram calibrados no campo com um dispositivo eletrônico para armazenar dados, modelo Cavadevice. As leituras manuais foram feitas em varios sensores ubicados nas duas profundidades e com diferentes tensões, para atingir toda a faixa de operação dos tensiômetros. A faixa horária foi a mesma que a safra anterior e antes do começo da irrigação.

A sinal de resposta do modelo linear (Figura 37) teve menor raiz do erro quadrático médio (2,0) que o de 2º ordem (6,2), resultando a eq. (63):

$$T = -6,338 + 0,027 \times SD \quad (63)$$

em que:

T é a tensão, em kPa, SD é a sinal digital, em mV

A eq. (63) foi similar à obtida por Camargo (2012), cuja origem e coeficiente linear foram -5,562 e 0,027 respectivamente.

Figura 37 – Dados observados no campo e curva de calibração linear dos transdutores, em ordenadas a tensão (τ) e em abscissas sinal digital (SD)

Com os tensiômetros já calibrados, pôde-se validar o modelo GAML quanto ao deslocamento da frente de umedecimento após de cada irrigação e também se o manejo da aspersão foi em torno de 10 kPa.

Na Figura 38 foi representado o funcionamento de dois tensiômetros num intervalo de 54 h, com registros cada 30 min. No dia 8-1-13, às 07:00, a leitura na camada superficial (0-0,10) indicou 10,3 kPa e não foi irrigado segundo estratégia de manejo. No decorrer do dia as tensões aumentaram de forma contínua até alcançar 25 kPa ao final da tarde (20:00) e pela noite mantiveram-se estáveis, com uma pequena variação de τ devido só ao potencial gravitacional, já que a camada superior esteve mais seca que a inferior. A irrigação foi feita na manhã, entre 07:00 e 07:30, o que permitiu que τ diminuísse rapidamente e, em 2 horas, alcançou a desejada (10 kPa), e 2 horas mais tarde desceu a 5,7 kPa, sempre na camada superficial. A partir das 11:30, a τ teve aumento até as 20:00, com média nesse intervalo de 11,3 kPa. Pela noite as leituras começaram a aumentar lentamente, indicando um processo de redistribuição da água para a camada inferior devido a dois fatores: i) maior potencial gravitacional (10 cm equivale a 1 kPa) e ii) maior conteúdo de água no solo. Na amanhã seguinte, as 07:00 a leitura foi de 15,6 kPa, indicando a necessidade de irrigação, e novamente as tensões desceram até valores em torno de 5 kPa. Deve destacar-se que durante essa noite o incremento de τ na camada superficial foi de 4,3 kPa.

O tensiômetro da camada inferior (0,10-0,20 m) acompanhou o funcionamento da camada superior, indicando que o aumento das tensões durante o dia teriam duas razões: i) uma importante densidade de raízes nessa camada que absorvem água e secam o solo ou ii) movimentação do fluxo para a camada superior e assim repor a extração que nela fazem as raízes. Para que este último suposto seja verdadeiro, as tensões da camada superficial não deveriam variar, situação que não ocorreu (Figura 38), porquanto o primeiro suposto seria mais apropriado, confirmando que as raízes do arroz têm bom desenvolvimento até 0,2 m.

Figura 38 – Funcionamento durante 54 h (8 ao 10-01-13) de dois tensiômetros a duas profundidades: 0-0,10 m e 0,10 a 0,20 m, instalados numa parcela de aspersão com transdutores de pressão e aquisição automática de dados cada 30 min

Com os tensiômetros da camada inferior também pôde ser comprovado o movimento do fluxo descrito no processo de infiltração, devido a quando foram feitas as aplicações, as tensões diminuíram de 20,4 a 10,6 kPa em 3 horas e, 1 hora mais tarde, estabilizou-se em torno de 8 kPa (Figura 38), possibilitando que parte da água fosse percolada. O cálculo da profundidade z da frente de umedecimento indicou 0,28 m, concordante com os resultados obtidos com os tensiômetros da camada inferior. Entretanto, o círculo cinza da Figura 38 indica variações de τ produto da influência da temperatura do ar, aspecto já mencionado.

Na Figura 39 se apresentam eventos de chuvas em conjunto com irrigações, desde o 28-12 até 6-1. Nos primeiros dias as tensões do tensiômetro da camada 0-

0,1 m estiveram em torno a 10 kPa e as irrigações foram diárias. Horas após τ nessa camada descia até 4-5 kPa, no entanto na camada inferior as tensões foram mais elevadas, em torno de 40 kPa e horas após de cada irrigação desciam até 30 kPa, para novamente aumentar durante o dia. Entretanto a camada inferior não teve trocas das tensões, elas foram incrementando-se gradualmente na camada superior, até atingir valores em torno de 30 kPa, ainda fazendo irrigações diárias. Isto indicaria que a água aplicada nesses dias não teve percolação, ou foi desprezível.

Figura 39 – Funcionamento durante 10 dias (28-12-12 ao 6-01-13) de dois tensiômetros a duas profundidades: 0-0,10 m e 0,10 a 0,20 m, instalados numa parcela de aspersão com transdutores de pressão e aquisição automática de dados cada 30 min

Os dois primeiros eventos de chuva da Figura 39 quase não alteraram a tendência dos tensiômetros, e apenas permitiram suspender uma aplicação, devido as PP serem espaçadas em 24 h. No contrário, os dois últimos permitiram diminuir rapidamente as tensões, em maior medida no tensiômetro superficial, e as aplicações seguintes mantiveram a umidade em torno de 10 kPa. O tensiômetro inferior também alcançou esse valor de τ por efeito das chuvas e da irrigação, indicando percolação tanto por irrigação como por chuvas. Pode se concluir que nas Figuras 38 e 39 estão representadas a sínteses do manejo da safra 2012-13.

4.6 Balanço hídrico

O espaço de tempo utilizado no balanço hídrico foi de 10 dias, para assim agrupar as irrigações e os eventos de chuvas. Após disso, para associar as

componentes do balanço com a fenologia e para possibilitar a análise estatística, foram novamente agrupados segundo os três estádios mais importantes: começo da irrigação até R1, R1 a R4 e R4 a R8 da escala de Counce et al. (2000).

4.6.1 Irrigação

Devido ao solo PlaNa apresentar drenagem impedido, a água aplicada com a irrigação na safra 2011-12 pôde ser retida no perfil do solo e acumulada na superfície, conforme aos tratamentos.

A análise da Lib permitiu validar uma das hipóteses dessa Tese em quanto à diminuição de lâminas aplicadas nos manejos alternativos da água. Além disso, é também uma variável fundamental para o cálculo dos demais componentes do balanço hídrico. Para sua determinação foram instalados hidrômetros em ambas as safras que funcionaram sem problemas, uma vez que as vazões aplicadas foram próximas à nominal.

O manejo AS apresentou diferenças da Lib no total do período da irrigação em relação aos manejos com inundação, ocorrendo a maior diferença ($p < 0,05$) entre diferenciação da panícula e antese (Tabela 18). Essas diferenças foram devidas à metodologia para definir o momento da irrigação em aspersão, isto é, leituras médias de 25 kPa nos tensiômetros a 0,2 m. A consequência desse manejo e da não ocorrência de precipitações no estádio com incremento da demanda de água, foi visualizado estresse hídrico nas folhas. Por isso, após a floração (fevereiro, com escassez de chuvas) foram aplicadas maiores lâminas, mas divididas em duas vezes ao dia devido às baixas taxas de infiltração deste solo. Não houve diferenças na Lib entre manejos de inundação nesta safra (Tabela 18). A razão deve-se a escassez das precipitações no ciclo, que foram um terço dos valores históricos.

É preciso indicar que o cálculo da Li_L para arroz irrigado com inundação não é concordante com o conceito tradicional, em que aquela é obtida segundo a capacidade de armazenamento de água na profundidade de exploração das raízes e a fração de depleção permitida, para poder determinar a lâmina bruta com as menores perdas possíveis. A aplicação de uma lâmina fixa e continua não considera a capacidade de armazenamento do solo, e também não no manejo intermitente isso pôde ser considerado. Só foi utilizado o conceito tradicional para determinar as lâminas a aplicar em AS segundo eq. (28).

Os resultados da Li_L indicaram que o manejo AS também foi significativamente menor ($p < 0,05$) que os manejos Ic e In , considerando todo o período da irrigação (Tabela 18). As diferenças foram maiores na fase inicial (média de 63 mm) que na fase final (média de 16 mm). Isto foi devido a que, no início da irrigação, os tratamentos com inundação saturaram o solo e pelo tanto acumularam mais água que nas parcelas com aspersão. Segundo eq. (9) ou eq. (10), a variação do armazenamento da água no solo na profundidade efetiva das raízes (ΔL) não foi considerada perda, porquanto, o manejo que mais acumulou água teve maior Li_L . Já no estágio final, a diferença de Li_L entre manejos foi devido às perdas por arrastamento do vento e desuniformidade da água aplicada pelos aspersores, que superaram as perdas por percolação profunda dos manejos com inundação. Na parcela principal não houve diferenças nas lâminas brutas e nas líquidas entre momentos de aplicação do N e tampouco ocorreu interação entre MOA e os manejos da água (Tabela 18).

Na safra 2012-13, h foi variável no manejo Ic , desde 0,03 m ao início da manhã até 0 ao final da tarde, no entanto no manejo In também foi variável, mas essa foi uma condição própria do tratamento. Houve diferenças ($p < 0,01$) na Lib para os manejos da água (Tabela 19), requerendo os tratamentos In e Ic , 71 e 118% mais lâmina de irrigação total, respectivamente, que AS. Também houve diferenças significativas entre Ic e In , mas de menor magnitude (27%), no entanto os tratamentos com diferentes doses de adubação com N não tiveram diferenças (Tabela 19). Os valores médios de Lib para cada aplicação resultaram em 31,4 e 44,1 mm para os tratamentos Ic e In respectivamente.

No cálculo da Li_L , além de $PerIr$, também influi ΔL ao início do período da irrigação, em que foi necessário levar a θ_{cc} aos tratamentos AS e saturar o solo nos tratamentos In e Ic para fornecer a lâmina h . Isto explicaria a menor Li_L ao início em AS com relação à In e Ic (Tabela 19). No período intermédio (R1 a R4) ΔL não influiu, e como no manejo AS foi aplicada menos Lib , isso significou menos $PerIr$ e pelo tanto não houve diferenças de Li_L entre AS e os manejos com inundação (Tabela 19).

Tabela 18 – Lâminas de irrigação líquida (Li_L) e bruta (Lib) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e momentos de aplicação do N na safra 2011-12, San Javier, Argentina

Cavari, Argentina								
		Li _L (mm)				Lib (mm)		
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação
Parcela Principal: Momentos de aplicação do N								
AT	241	60	102	403	337	117	164	618
AP	240	56	101	397	331	106	164	601
Sub-parcelas: Manejos da água								
AS	198 a	55	90 a	344 a	320	97 a	153	570 a
In	260 b	60	106 b	430 b	343	121 b	165	628 b
Ic	263 b	60	108 b	429 b	340	115 b	175	630 b
Parcela Principal	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejos	**	ns	*	***	ns	*	ns	*
Parcela Principal x Manejos	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV%	10,8	16,9	13,2	5,3	9,5	13,9	14,9	8,9

Nota - Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

R1, diferenciação da panícula; R4, antese; R8, maturidade fisiológica completa segundo escala de Counce et al.(2000).

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo.

Já no final (R4 a R8), a Li_L do manejo AS foi significativamente ($p < 0,05$) maior que nos manejos In e Ic (Tabela 19). Devido à ΔL não ter influência porque o armazenamento não mudou, somente pode ser explicadas as diferenças na PerI_r, isto é, as irrigações em In ou Ic geraram maiores perdas. Porém, quantitativamente foram muito pequenas (média de 10 mm no período).

O balanço final da Li_L entre Ic, In e AS indicou que houve diferenças ($p < 0,05$) entre eles (Tabela 19), mas com quantidades em torno de 12 mm, o que representa 4% da Li_L média de todos os manejos. Nos tratamentos com doses de adubação do N não ocorreram diferenças nas lâminas brutas e nas líquidas e tampouco ocorreu interação entre ambos os fatores (Tabela 19).

Tabela 19 – Lâminas de irrigação bruta (Lib) e líquida (Li_L) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e doses de adubação com N na safra 2012-13, San Javier, Argentina

	Li _L (mm)				Lib (mm)			
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação
Fator A: Manejos da água								
AS	83 a	111	86 b	280 a	216 a	168 a	149 a	532 a
In	106 b	112	75 a	293 b	416 b	278 b	218 b	912 b
Ic	110 b	117	76 a	303 c	440 c	407 c	314 c	1160 c
Fator B: Doses de adubação do N								
T0	98 a	114	79	292	343	286	223	862
T1	98 a	114	78	290	359	284	228	871
T2	102 a	112	80	295	369	278	230	871
Manejos	***	ns	*	*	***	***	***	***
Adubação	ns	ns	ns	ns	ns	x	ns	x
Manejos x Adubação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV%	6	1	2,6	2,4	7,2	7,6	4,2	4,7

Nota - Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo.

Por outro lado, na determinação da Li_L dos tratamentos com inundação segundo eq. (9), Dss foi considerada desprezível devido ao baixos valores de Kh no solo PlaNa e porque os carregadores entre parcelas foram alagados para evitar fluxo lateral (seepage).

A componente h é considerada uma perda segundo eq. (8) devido a no final da irrigação a água acumulada é esvaziada para favorecer a secagem dos grãos e também para evitar o trânsito das máquinas sob solo úmido durante a colheita. Nos tratamentos Ic e In da safra 2011-12 h foi, em média, 0,04 m, e considerada para estimativa da Li_L no período inicial da irrigação. No entanto na safra seguinte h foi aplicada diariamente e, quando cessou a irrigação, não havia água acumulada nas parcelas, porquanto não foi considerada para o cálculo da Li_L.

O cálculo de ΔL (eq. 19) nos tratamentos Ic e In foi realizado numa camada maior à considerada em AS, de 0,4 m, isto é, o começo da camada mais argilosa. Na safra 2011-12, o valor médio de θ_i (início irrigação) foi $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e ao final dela o solo ficou saturado nos tratamentos com inundação, pelo tanto θ_f foi igual a θ_s . Este valor, segundo eq.(18), foi variável na camada superficial do solo PlaNa devido aos câmbios das densidades antes e após da irrigação, e com isso ΔL resultou em

104 mm. Nesta mesma safra, nos tratamentos AS, uma parte das lâminas aplicadas ao início da irrigação permitiram que o solo alcance θ_{cc} (10 kPa) e, considerando o conteúdo de água ao início, ΔL foi de 41 mm.

Já na safra 2012-13, o valor médio de θ_i foi $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e ao final o solo não ficou saturado senão em θ_{cc} , em todos os manejos por igual, devido à maior infiltração deste solo. Assim, ΔL para as camadas superficiais (0,4 m) foi 35 mm, sem mudar as densidades para o cálculo de θ_s .

4.6.2 Necessidades de água

Na primeira safra, a componente ETr teve diferenças ($p < 0,01$) entre AS e os tratamentos com inundação nos estádios R1 a R4 e R4 a R8. Porém, não apresentou diferenças considerando tanto o período da irrigação quanto o ciclo total da cultura (Tabela 20). A razão foi que no período desde começo da irrigação até R1, o consumo da água representou a maior proporção do total da ETr (47%), mas sem diferenças entre os manejos.

Por outro lado não houve diferenças entre MOA do N, com médias de 432 e 563 mm para o período de irrigação e o ciclo total da cultura, respectivamente. Tampouco ocorreu interação entre parcela principal e os manejos da água (Tabela 20). Considerando o período da irrigação da safra 2011-12, os valores de ETo foram 6% mais baixos que a média de ETr de todos os tratamentos, no entanto no ciclo total da cultura foi inverso, isto é, ETo superou a ETr em 17%. A principal diferença ocorreu no período inicial da cultura (Tabela 20), sem irrigação, onde as plantas tiveram muito baixo consumo de água e pelo tanto ETo foi muito superior a ETr.

Nesta safra as precipitações estiveram muito abaixo das médias históricas, aportando, em 8 eventos, respectivamente 18, 48 e 18% da ETr nos três estádios do período da irrigação. Na estimativa da ETr, PP foi totalmente aproveitada, isto é, não foram consideradas perdas por percolação devidas às chuvas (PerP desprezível) e a proporção de sua aporte ao valor médio da ETr no período da irrigação foi de 26%.

Tabela 20 - Evapotranspiração real (ETr) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e momentos de aplicação do N, Evapotranspiração de referência (ETo) e Precipitação total (PP) na safra 2011-12, San Javier, Argentina

ETr (mm)							
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação	inicial	final	Total ciclo
Parcela Principal: Momentos de aplicação do N							-
AT	205	111	122	438			569
AP	198	105	123	426			557
Sub-parcelas: Manejos da água					81	50	-
AS	208	100 a	114 a	422			553
In	196	112 b	126 b	433			564
Ic	200	113 b	128 b	441			572
Parcela Principal	ns	ns	ns	ns	-	-	-
Manejos	ns	**	**	ns	-	-	-
Parcela Principal x Manejos	ns	ns	ns	ns	-	-	-
CV%	7,3	7,2	8,2	4,1	-	-	-
ETo (mm)	201	99	108	408	202	50	660
PP (mm)	37	52	22,5	111,5	72	108	291,5

Nota - Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo.

Na safra seguinte, e devido às altas perdas por percolação, na estimativa da ETr considerou-se a componente P_e , porque as precipitações no período da irrigação (Tabela 21), não foram totalmente aproveitadas pela cultura. As perdas foram exclusivamente por percolação (P_{erP}) e não devido a escoamento superficial.

Os tratamentos com diferentes doses de adubação do N, ao igual que nos momentos de aplicação do N, não tiveram diferenças da ETr (Tabela 21), com médias de 476 e 604 mm para o período de irrigação e ciclo total da cultura, respectivamente.

Diferenças da ETr ocorreram entre manejos da água no começo da irrigação até R1, embora estatisticamente significativas ($p < 0,05$) baixas em quantidade (média de 11 mm), e já nos estádios posteriores não houve diferenças (Tabela 21). A razão da diferença no estágio inicial deve-se à concordância de dois aspectos. O primeiro está relacionado com L_{iL} , dado que no estágio inicial do manejo AS, esta variável foi menor que nos tratamentos com inundação (Tabela 20) e pelo tanto é razoável que ETr seja menor também. Porém, também teve influência P_e , devido às parcelas com AS tiveram o solo não saturado quando ocorreram as precipitações e pelo tanto um

maior aproveitamento delas. Além disso, a menor ETr em AS neste estágio também pôde ser devido a menor Ev do solo, ainda que não tivesse nenhuma implicância no desenvolvimento da cultura.

Tabela 21 - Evapotranspiração real (ETr) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e doses de adubação com N, Evapotranspiração de referência (ETo) e Precipitação total (PP) na safra 2012-13, San Javier, Argentina

ETr (mm)							
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação	inicial	final	Total ciclo
Fator A: Manejos da água							
AS	159 a	171	140	471			599
Ic	170 b	169	140	478			606
In	170 b	167	141	479			607
					70	58	
Fator B: Doses de adubação do N							
T0	165	170	141	475			603
T1	166	169	139	474			602
T2	169	168	142	479			607
Manejos	***	ns	ns	*			
Adubação	ns	ns	ns	ns			
Manejos x Adubação	ns	ns	ns	ns			
CV%	2,9	0,8	1,6	1,2			
ETo (mm)	155	139	115	409	175	58	642
PP (mm)	208	119	76	404	163	0	507

Nota: Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo.

A relação entre ETr e ETo também foi variável como à safra anterior, isto é, considerando o período da irrigação, os valores da ETo foram 14% mais baixos que a média da ETr de todos os tratamentos, no entanto no ciclo total da cultura foi inverso, ou seja, ETo superou a ETr em 6%. Do mesmo modo, a principal diferença ocorreu no período inicial da cultura (Tabela 21). Nesta safra, o aporte das precipitações a ETr no período de irrigação foi mais elevado que na safra anterior, alcançando, em média, 46%.

4.6.3 Coeficiente único de cultivo

O comportamento de Kc acompanhou à ETr, isto é, naqueles tratamentos onde ETr foi estatisticamente diferente, o mesmo ocorreu com Kc, tal como na safra

2011-12 (Tabela 22) ou 2012-13 (Tabela 23). Isto é razoável devido a que ETo foi igual para todos os tratamentos. Nesse sentido, a ETr da segunda safra foi maior que na primeira, especialmente desde R1 até maturação fisiológica, porquanto Kc também foi maior, com incrementos entre 6 e 9% segundo os estádios. Deve-se mencionar que a utilização de duas casas decimais para os valores de Kc obedeceu ao fato da comparação entre tratamentos.

Também não houve diferenças de Kc entre momentos de aplicação (Tabela 22) ou doses do N (Tabela 23), nem interação entre fatores. Os valores de CV da análise da variância foram mais altos na primeira safra (Tabela 22) ao igual que ocorreu na ETr.

Tabela 22 – Coeficiente único de Cultivo (Kc) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e momentos de aplicação do N na safra 2011-12, San Javier, Argentina

Coeficiente de Cultivo (Kc)					
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	inicial	final
Parcela Principal: Momentos de aplicação do N				-	-
AT	1,00	1,18	1,11		
AP	0,95	1,13	1,13		
Sub-parcelas: Manejos da água				0,4 *	1 *
AS	1,02 b	1,06 a	1,04 a		
In	0,95 a	1,19 b	1,15 b		
Ic	0,96 a	1,21 b	1,17 b		
Parcela Principal	ns	ns	ns	-	-
Manejos Parcela	*	**	*	-	-
Principal x Manejos	ns	ns	ns	-	-
CV%	3,9	7,2	8,2	-	-

Nota: Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD;

ns, não significativo

* Valores adaptados de Allen et al. (2006)

Os valores inicial e final de Kc para ambas as safras foram adaptados de Allen et al. (2006). Para o primeiro, foi considerada a semeadura feita em sequeiro, isto é, somente com o aporte das precipitações e com pouca cobertura vegetal, por isso o valor de 0,4. No final, após do período da irrigação, aqueles autores propõem 0,7, mas como as parcelas nesse momento estavam alagadas pelas precipitações do começo do mês de março (2011-12), foi considerado que toda a demanda evapotranspiratoria (ETo) fosse fornecida como Ev desde a superfície do solo (Kc

igual a 1,0). Na safra seguinte, o solo teve menos quantidade de água (ficou em θ_{cc}), mas também foi considerado o valor de 1,0 para o K_c .

Tabela 23 – Coeficiente único de Cultivo (K_c) nos diferentes estádios fenológicos segundo manejos da água e doses de adubação com N na safra 2012-13, San Javier, Argentina

Coeficiente de Cultivo (K_c)					
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	inicial	final
Fator A: Manejos da água					
AS	1,03	1,23	1,22	-	-
Ic	1,05	1,21	1,22		
In	1,06	1,21	1,23		
Fator B: Doses de adubação do N					
T0	1,03	1,22	1,23	0,4 +	1 +
T1	1,04	1,22	1,21		
T2	1,07	1,22	1,23		
Manejos	ns	ns	ns	-	-
Adubação	ns	ns	ns	-	-
Manejos x Adubação	ns	ns	ns	-	-
CV%	2,9	0,8	1,6	-	-

Nota - Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

ns, não significativo

+ Valores adaptados de Allen et al. (2006)

4.6.4 Perdas por percolação e escoamento superficial

As caixas colocadas no campo funcionaram bem na primeira safra quando foi possível acumular uma lâmina de água na superfície, mas na segunda, onde isso não aconteceu, já as aplicações sob as caixas não foram adequadas e as plantas ficaram frequentemente com estresse hídrico, porquanto não foram considerados esses dados.

No solo PlaNa, as diferenças de leituras das régua exterior e interior colocadas nas caixas para estimar percolação tiveram, em média, 74 mm, com máximos e mínimos de 143 e 46 mm, isto é, muita alta variabilidade. As plantas dentro das caixas tiveram o mesmo desenvolvimento que as demais, mas considerando que o solo no início estava com baixa umidade (14%), e que ao final do ciclo esteja saturado (aproximadamente 50%, ainda que ρ_s não foi medida a compactação inicial foi eliminada com o preparo das caixas) os valores determinados apenas permitiriam completar a quantidade de água necessária para

saturar o solo e, com isso, não haveria percolação nenhuma (Per desprezível). Porém, não foram considerados esses dados como certos para incorporar ao BH.

Outra estimativa foi feita considerando $K_h(\theta)$ a partir dos dados da CRH segundo método de Genuchten (1980). Para isso devem ser conceituadas as condições do fluxo no solo no período da irrigação. No início, o solo encontra-se com conteúdos de água variáveis, em função das precipitações no período prévio. Para alagar rapidamente as parcelas (o mesmo que nos tabuleiros na condição de campo), aplicaram-se altas vazões, que geram condições propícias para aprisionar o ar entre os poros. A frente de umedecimento avança para o interior do solo segundo esquematizado na Figura 40, tal como já foi descrito no modelo GAML, saturando progressivamente os poros, embora o ar contido neles só pudesse sair para a atmosfera quando estivesse na camada superficial, no entanto o ar das camadas mais profundas ficou aprisionado. Como consequência, na interfase da frente de umedecimento, o solo não estaria saturado e, pelo tanto, é válido considerar que K_h depende de θ .

A ideia exposta é válida para qualquer manejo da água, sempre e quando as lâminas infiltradas permitam atingir até uma profundidade (z_1) por debaixo da zona das raízes. A lâmina acumulada na superfície (h) seria fixa em I_c e variável em I_n (Figura 40). Ao igual que o modelo GAML, foi suposto que a taxa de infiltração e a frente de umedecimento são homogêneos na camada considerada.

Figura 40 - Esquema conceitual do movimento da água nas parcelas irrigadas

A variação de $K_h(\theta)$ em relação à θ para o solo PlaNa nas camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 m (Figura 41) indica que $K_h(\theta)$ diminui em torno de uma ordem de magnitude para variações de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de θ . Na camada sub-superficial, a curva é

quase linear, não assim a superficial, mais do tipo exponencial. A partir de $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a diminuição da $K_h(\theta)$ da camada superficial é maior, indicando as dificuldades da movimentação da água para as raízes quando o solo começa a secar-se, fato que acontece na etapa inicial do crescimento.

No solo RegAb, a diminuição de $K_h(\theta)$ também foi em torno de um ordem de magnitude para variações de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de θ , mas devido a K_{hs} ser maior que no solo PlaNa, também $K_h(\theta)$ resultou maior para igual conteúdo de água. A camada superficial do RegAb tem um comportamento diferente ao resto das camadas, dado que para iguais valores de θ , a queda de $K_h(\theta)$ foi maior (Figura 42). Isto poderia se dever a problemas de compactação do solo, embora nem ρ_s nem RP foram maiores que as outras camadas.

Dewandel et al. (2008) também referem diminuições de $K_h(\theta)$ em torno de um ordem de magnitude para variações de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de θ em solos franco-argilo arenoso cultivados com arroz na Índia, que podem alcançar até dois ordens para solos franco arenosos cultivados com flores ou vegetais.

Durante o período da irrigação, o avanço do frente úmido no solo PlaNa foi progressivo pela baixa condutividade hidráulica e, após do alcançar o equilíbrio, supôs-se que todas as camadas tinham umidades semelhantes, embora não saturadas pelo ar aprisionado entre seus poros. Uma evidência disso foi que na camada argilosa (0,25-0,4 m) foram colocados piezômetros nas parcelas com inundação, nos quais nunca se observou água em seu interior. Isso significaria que o solo nessa camada não ficou saturado, embora seja de supor que com conteúdos de água muito elevados.

Figura 41 – Curvas de condutividade hidráulica não saturada $K_h(\theta)$, em relação ao conteúdo de água (θ) para as camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 m do solo PlaNa, San Javier, Argentina

Figura 42 – Curvas de condutividade hidráulica não saturada $K_h(\theta)$, em relação ao conteúdo de água (θ) para as camadas 0-0,10, 0,10-0,19, 0,19-0,4, 0,4-0,6 m do solo RegAb, San Javier, Argentina

Uma situação semelhante na qual o ar ficou aprisionado, mas após de precipitações muito importantes, foi descrita por Taboada, Lavado e Camilión (1988) para a bacia do Salado na província de Buenos Aires, Argentina, com condições agroecológicas semelhantes às descritas para a região Vz. Assim, se as camadas superficiais ficassem todas com potenciais semelhantes e em torno a -10 kPa (retenção da água capilar), o valor de q seria igual à $K_h(\theta)$ porque o gradiente do

potencial resultaria unitário. Nestas condições, Per_{lr} resultou em torno de 2,8 mm d⁻¹ para o solo PlaNa (Tabela 24).

No solo RegAb, com maiores Kh_s e $Kh(\theta)$, os postulados anteriores também são válidos porque entre a superfície e o lençol freático, o solo, ainda no período da irrigação, ficou saturado apenas nas camadas superficiais e a movimentação da água foi com fluxo não saturado. O valor obtido para as diferentes camadas esteve em torno a 30 mm d⁻¹ (Tabela 24), exceto na superficial (0-0,1), mas como ela ficou saturada pela irrigação, não foram impedidos ao fluxo descer e percolar. Estes resultados foram corroborados com o teste de infiltração feito nas parcelas, porquanto foram finalmente incorporados aos cálculos do BH, mas com adaptações segundo os diferentes manejos.

Por outro lado, imediatamente após de advertida tão alta percolação neste solo, foram escavadas valetas nos carregadores, aos lados das parcelas irrigadas com inundação, até 0,6 m de profundidade, não encontrando fluxo lateral, porquanto o movimento principal foi vertical descente. Após disso, todos os carregadores foram cheios com água para evitar o fluxo D_{ss} por debaixo das taipas, prática comum em experimentos de irrigação em arroz (BOUMAN e TUONG, 2001; MEZZOMO, 2009).

Tabela 24 – Condutividades hidráulicas não saturadas $Kh(\theta)$ e conteúdos de água a capacidade de campo (θ_1) para o solo RegAb e PlaNa, San Javier, Argentina

RegAb				PlaNa			
camada	θ_1	$Kh(\theta)$		camada	θ_1	$Kh(\theta)$	
m	m ³ m ⁻³	m s ⁻¹	mm d ⁻¹	m	m ³ m ⁻³	m s ⁻¹	mm d ⁻¹
0-0,10	0,40	1,30763E-07	11,3	0-0,11	0,44	7,739E-07	2,8
0,10-0,19	0,36	3,61835E-07	31,3	0,11-0,25	0,37	7,714E-07	2,8
0,19-0,4	0,33	3,53844E-07	30,6				
0,4-0,6	0,37	3,53327E-07	30,5				

Nota - θ_1 Valores obtidos da CRH com Ψ_m -10 kPa

Os resultados da percolação das duas safras foram muito contrastantes. No solo PlaNa, só os manejos com inundação tiveram Per_{lr} , no entanto no AS foi desprezível e também não foi considerada Per_P , devido às baixas magnitudes das chuvas nessa safra. Assim, nos primeiros dias após da inundação, foi considerado que a água que infiltrava era armazenada (ΔL) no perfil até 0,4 m, a partir do valor de θ_i e de a máxima capacidade de armazenagem nessa camada (Tabela 25), processo que foi estimado em 20 dias. Após isso, com cada irrigação foi adotado 2,8

mm d⁻¹ de Perlr. Deve ser mencionado que no manejo AS também foi considerada ΔL desde θ_i até θ_{cc} , embora após disso não houvesse percolação.

Tabela 25 - Lâminas de água armazenadas (mm) a diferentes tensões (kPa) segundo CRH para as camadas 0-0,11 e 0,11-0,25 do solo PlaNa e 0-0,1; 0,1-0,19; 0,19-0,4 e 0,4-0,6 do solo RegAb

Solo	Camada (m)	Tensões (kPa)				
		0	10	30	100	1500
		Lâminas de água retidas (mm)				
PlaNa	0-0,11	55	44	36	27	12
	0,11-0,25	54	47	42	35	22
RegAb	0-0,1	45	40	34	26	13
	0,1-0,19	37	33	29	22	10
	0,19-0,4	84	72	65	51	23
	0,4-0,6	87	76	70	55	22

No solo RegAb, ao contrário, foram calculadas Perlr e PerP após de cada irrigação ou evento de chuva, diferentes segundo os manejos da água. No caso de Perlr do manejo AS, após das primeiras irrigações necessárias para levar o conteúdo de água até θ_{cc} (Tabela 25), com cada aplicação o solo ficava saturado na camada superficial (0,2 m) durante 30 min e, após de este tempo, em capacidade de campo, descendo gradualmente o conteúdo de água até a seguinte aplicação, segundo as leituras dos tensiômetros. Assim, a água ocupava os poros gravitacionais para ser consumida pelas plantas ou também percolar, embora a quantidade acumulada entre saturação e 10 kPa na camada superficial (0-0,19 m) seria em torno de 9 mm (Tabela 25).

No caso dos manejos com inundação, foi necessário aplicar lâminas para saturar o solo até uma profundidade de 0,4 m, e após iniciar os tratamentos, aplicando 0,03 m ou 0,04 m, segundo Ic ou In respectivamente. Com cada aplicação uma proporção dela foi percolada, segundo o valor de θ em que se encontravam as camadas superficiais do solo. Para seu estimativa, considerou-se a água que podia ser acumulada entre saturação e 10 kPa na camada 0-0,19 m (Tabela 25) e a diferença foi considerada Perlr.

Para determinar PerP no período da irrigação, primeiramente foram consideradas as magnitudes dos eventos, de maneira que para chuvas menores a 10 mm, PerP foi desprezível. Para eventos maiores a 10 mm, foi considerado o

intervalo em dias para fazer uma nova irrigação, tanto com leitura dos tensiômetros (AS e In) ou das régua (Ic). Em nenhum caso ocorreu que após de uma chuva a seguinte aplicação fosse maior que dois dias, porquanto foi utilizado o mesmo valor de água acumulada que o manejo In, que também foi irrigado cada dois dias, e representou o duplo de água acumulada para o manejo AS, de frequência diária.

Os resultados da Perlr são apresentados na Tabela 26. Para o solo PlaNa, e considerando o período total da irrigação, representou o 25% da Lib média dos tratamentos com inundação.

Para o solo RegAb, AS teve a menor Perlr e foram estatisticamente diferente ($p < 0,001$) aos manejos Ic e In durante toda a irrigação (Tabela 26). É preciso notar que em algumas aplicações Perlr foi desprezível e em outras foi importante, representando o 37% em relação à Lib do manejo AS. Neste solo, a maior Perlr correspondeu ao manejo Ic devido às aplicações diárias para proporcionar uma lâmina em torno de 0,03 m (Tabela 26). O total da Perlr representou o 74% da Lib deste manejo, e foi estatisticamente diferente ($p < 0,001$) ao manejo In em todos os estádios, exceto ao início do período da irrigação. A razão disso foi a maior quantidade de dias com precipitações nos meses de novembro e dezembro, que diminuíram as frequências de irrigações e pelo tanto houve menor número de dias com Perlr.

Embora o manejo In ter valores de Perlr menores a Ic, considerando o período total da irrigação, a média de todas as aplicações foi superior a Ic (Tabela 26) devido à necessidade de proporcionar uma lâmina em torno de 0,04 m, o que significou uma maior percolação por cada aplicação feita. Em relação à Lib, Perlr representou o 68%, algo menor ao manejo Ic.

Na safra 2012-13, no período da irrigação ocorreram 19 eventos de precipitações, mas só 9 deles tiveram PerP. A proporção dessa componente foi o 46% da PP para o período completo, resultando similares proporções em cada estádio. Ao início da irrigação foram as maiores perdas (Tabela 26), representando o 57% do total da PerP. A média da PerP de todos os eventos foi de 20 mm, com máximos e mínimos de 60 e 9 mm respectivamente, ou seja, muito alta variabilidade (CV de 84%). A maior PerP ocorreu após de uma chuva de 75 mm (18/12/12) e até dois dias posteriores houve água armazenada nas parcelas. Assim, e supondo que a percolação ocorreu durante esses dois dias, também se verifica que a percolação desse solo está em torno de 30 mm d⁻¹.

Tabela 26 – Perdas por percolação profunda devida à irrigação (PerIr) e às precipitações (PerP) nas safras 2011-12 e 2011-13, San Javier, Argentina

Safras 2011-12 e 2011-12, San Javier, Argentina					
	Percolação devida à irrigação (PerIr, mm)				Média das aplicações
	Começo da irrigação até R1	R1 a R4	R4 a R8	Total período irrigação	
Safr 2011-12 (1)					
	39	56	59	154	2,8
Safr 2012-13					
Fator A: Manejos da água					
AS	111 a	40 a	47 a	198 a	5,2
In	310 b	165 b	143 b	619 b	30,0
Ic	330 b	290 c	238 c	858 c	23,3
Fator B: Doses de adubação do N					
T0	238	176	139	552	-
T1	254	164	145	563	-
T2	260	155	145	559	-
Manejos	***	ns	*	***	-
Adubação	ns	ns	ns	ns	-
Manejos x Adubação	ns	ns	ns	ns	-
CV%	6	1	2,6	2,4	-
Percolação devida às precipitações (PerP, mm)					
Safr 2012-13					
	107	64	15	185	-

Nota: Valores médios nas colunas de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

* significância F com $p < 0,05$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

(1) Corresponde à média dos tratamentos In e Ic

4.7 Desenvolvimento da Cultura

4.7.1 Fenologia

Nas condições de campo nem todas as plantas de arroz e colmos de uma mesma planta alcançam o mesmo estágio fenológico em simultâneo (YOSHIDA, 1981). Assim, a determinação segundo a metodologia de Counce et al. (2000) foi visual e considerando que estavam nesse estágio mais do 50% das plantas da parcela (EMBRAPA, 2009). Também foram feitas as determinações de ST para avaliar seus valores na região de San Javier para o cultivar Puitá INTA. Para adotar o valor de Tb, embora não tenham sido feitas pesquisas na Argentina, foram consideradas pesquisas no Sul do Brasil, com condições ambientais similares, que indicaram Tb igual a 11°C para vários cultivares (EMBRAPA, 2009). Quintero (2009)

também utilizou esse valor para variedades de arroz produzidas em Entre Ríos (Argentina), região vizinha a San Javier.

A ocorrência dos estádios ontogênicos foi igual em todos os tratamentos, a exceção do manejo com aspersão na primeira safra. A duração total do ciclo do arroz em ambas as safras foram similares, embora as datas de semeadura tivessem quase 30 dias de diferença. Na safra 2011-12, as plantas emergiram 12 dias após da semeadura (DAS) com uma densidade média de 181 pl m⁻², no entanto, no ano seguinte a emergência foi 11 DAS, com densidade média menor, de 132 pl m⁻². A análise estatística indicou que não houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos em nenhuma das safras (dados não apresentados). Ambas as safras demoraram quase os mesmos dias para emergir provavelmente devido às temperaturas do solo serem semelhantes em ambas as safras. Pesquisas feitas em Corrientes (Argentina) indicam temperaturas do solo ótimas para a germinação de 26°C (INTA, 2008), mas em San Javier, e considerando a T_m do ar, as sementes germinaram com temperaturas menores, em torno de 24 °C.

Foi avaliado o poder germinativo das sementes utilizadas pelos produtores, que resultou muito baixo, com média de 66%. Além disso, considerando as sementes que poderiam emergir e as densidades efetivamente conseguidas, as taxas de emergências foram 66 e 40% para as safras 2011-12 e 2012-13 respectivamente. A diferença na densidade de plantas na emergência entre safras foi devido à palha da colheita anterior (plantio direto), já que a semeadora pneumática não conseguiu sua adequada ruptura e deixou nela muitas sementes. Quintero (2009) determinou uma média de 190 pl m⁻² para o mesmo cultivar no Entre Ríos, o que indicaria uma melhor qualidade de semeadura e maior atenção dos produtores nessa prática cultural.

O ciclo da irrigação iniciou-se entre 4 a 5 folhas (V4-V5) indicando o início de perfilhamento, 22 e 25 dias após da emergência (DAE) nas safras 2011-12 e 2012-13 respectivamente. Os perfilhos foram identificados quando tenham 4 folhas (FAGERIA, 2007). Para uma adequada geração de perfilhos, a T_m neste estágio deve estar em torno de 25°C (CHEBATAROFF, 1998), sendo melhor para isso a data de semeadura de novembro da primeira safra. O período vegetativo ocorre desde emergência até R0 (iniciação da panícula) segundo Yoshida (1981) e Fageria (2007). Porém, neste trabalho foi considerado desde emergência até R1, devido à neste estágio a panícula é visível (1 a 2 mm) e possível de se determinar a campo

mediante um corte longitudinal no colmo principal, no entanto para R0 é necessário microscópio para sua determinação R0 (YOSHIDA, 1981), além que entre os estádios R0 a R1 a quantidade de dias é pequena (COUNCE et al., 2000). Feita esta aclaração, o período vegetativo teve uma duração igual em ambas as safras, de 55 DAE (Tabela 27), o que representou aproximadamente a metade do ciclo total da cultura, próprio de cultivares de arroz ANA Índicos semi-anãs (YOSHIDA, 1981). Porém, as somas térmicas (ST) para alcançar R1 foram menores na 2ª safra (9%) devido à semeadura antecipada (Tabela 27).

O estágio R2 da escala de Counce (formação do colar da folha bandeira), estágio no qual ocorre a microsporogênese (COUNCE et al., 2000) ou emborrachamento (EMBRAPA, 2009), ocorreu 75 DAE e 80 DAE nas safras 2011-12 e 2012-13 respectivamente e 10 dias prévios à antese. Na safra 2011-12 o manejo de aspersão teve, neste estágio, um atraso, produto de um incipiente estresse hídrico. Por outro lado, e como já fora mencionado no tópico de temperaturas, em nenhuma das safras as T_{min} afetaram negativamente as plantas.

O estágio R4 da escala de Counce et al. (2000) foi considerado quando as primeiras flores da panícula do colmo principal alcançaram a antese. Na safra 2011-12 houve diferenças em R4 segundo manejo da água. Nos tratamentos com inundação aconteceram 85 DAE e com aspersão 6 dias após, indicando um atraso neste estágio que foi mantido até a maturidade fisiológica. Já na safra 2012-13 não houve diferenças entre manejos, e o estágio R4 teve apenas 3 dias menos até a emergência que na safra anterior, embora ST seja 16% menor (Tabela 27).

Tabela 27 – Estádios ontogênicos do cultivar Puitá INTA CL observados a campo e segundo Somas Térmicas (ST) totais, considerando tanto os dias após da semeadura (DAS), quanto à emergência (DAE) e a duração de cada estágio (DE), nas safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina

Estádios ontogênicos	Safra 2011-12				Safra 2012-13			
	DAS dias	DAE dias	ST °C d	DE	DAS dias	DAE dias	ST °C d	DE dias
Emergência	12	-	-	12	11	-	-	11
Emergência -R1	67	55	806	55	66	55	736	55
R1-R4	97*	85*	1.264*	30	93	82	1.104	27
R4-R8	117	105*	1.544*	20	115	104	1.417	22
Colheita	127	-	-	10	125	-	-	10

Nota - * Valores correspondentes aos tratamentos com inundação

Ambas as safras tiveram similares DAE para alcançar R8, embora na safra 2012-13 a duração do estágio (DE) entre R4 e R8 foi levemente maior (Tabela 27). Também neste período finalizou a determinação de ST.

As colheitas foram em fevereiro e março nas safras 2012-13 e 2011-12 respectivamente, com média de 11 dias após de R8. Embora sejam diferentes meses, a taxa de dessecamento foi similar e a umidade média dos grãos foi de 24%, que é a ótima para arroz casca (Mc CAULEY, 1990). A duração do ciclo em ambas as safras foi quase igual, com média de 126 dias, no entanto ST acumuladas no ciclo tiveram 8% de diferença entre safras, com média de 1.481°C d.

4.7.1.1 Evolução da biomassa aérea - Safra 2011-12

Na safra 2011-12 foram feitas cinco determinações de biomassa aérea devido à necessidade de avaliar a resposta ao momento da adubação com N. Na primeira determinação (IP), embora não haviam começado nem os tratamentos de irrigação nem com adubação, foram extraídas amostras de plantas nas parcelas atribuídas a cada manejo da água para ter as condições iniciais do experimento. Nas seguintes já foram feitas comparações estatísticas entre tratamentos, sendo válido o suposto de homocedasticidade devido a cada medição foram extraídas plantas aleatoriamente, cuidando de não obter-as próximas às medições prévias.

Os órgãos vegetais analisados para avaliar a taxa de crescimento, o IAF e a AFE nos diferentes estádios fenológicos correspondem-se com os referidos por Yoshida (1981) e Fageria (2007). A separação da lâmina da folha (*leaf blade*) da bainha (*leaf sheaths*) foi devido a só a primeira incide no IAF (YOSHIDA, 1981). O agrupamento da biomassa do colmo com a bainha (BB+C) foi devido ao primeiro tem pouco desenvolvimento nos estádios iniciais e antes da floração ele está completamente envolto pela bainha. Além disso, ambos os órgãos acumulam carboidratos que são deslocados aos grãos após da floração (YOSHIDA, 1981).

4.7.1.2 Estádio vegetativo

Na Tabela 28 são apresentados os resultados da evolução dos órgãos, desde semeadura até 15 dias prévios a diferenciação da panícula. Imediatamente antes do começo da irrigação (35 DAS, IP) as determinações foram muito variáveis (entre 30

a 50%), indicando problemas de crescimento nas plantas no agro-ecossistema Vz quando elas não são irrigadas, provavelmente devido a diferenças no momento de emergência. Nenhum dos órgãos teve diferença estatística entre tratamentos, e a média da BAT foi de 354 kg ha⁻¹ (Tabela 28), valor aceitável no estágio IP segundo Fageria e Baligar (2001), que referem desde 313 kg ha⁻¹ de biomassa aérea (*shoot*) sem adubação com N, até máximos de 450 kg ha⁻¹ com 150 unidades de N, para o mesmo estágio em arroz ANA. As proporções da BFV e BB+C foram 0,57 e 0,43 respectivamente, com lâminas pequenas e resultando BB+C quase tudo bainha, órgão que acumula carboidratos para fornecer aos perfilhos até que eles sejam autótrofos (YOSHIDA, 1981).

Tabela 28 – Evolução biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa bainha e colmo (BB+C) e número de colmos (Nºcolmos) para o estágio vegetativo do arroz dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) da safra 2011-12, San Javier, Argentina

DAS	Componente	MOA		Manejos da água			Fonte de variação			
		AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	CV
35 - IP	BAT (kg ha ⁻¹)	356	340	348	343	385	ns	ns	ns	35,8
	BFV (kg ha ⁻¹)	207	189	196	205	209	ns	ns	ns	43,4
	BB+C (kg ha ⁻¹)	148	151	152	138	175	ns	ns	ns	31,0
	Nºcolmos m ⁻²	731	835	777	670	1.100	ns	ns	ns	47,3
55 - MP	BAT (kg ha ⁻¹)	3.256	3.033	2.971	3.261	3.200	ns	ns	ns	22,3
	BFV (kg ha ⁻¹)	1.608	1.578	1.473	1.625	1.681	ns	ns	ns	20,3
	BB+C (kg ha ⁻¹)	1.648	1.455	1.498	1.636	1.520	ns	ns	ns	24,7
	Nºcolmos m ⁻²	1.266	1.324	1.500	1.154	1.230	ns	ns	ns	19,0

Nota: Valores médios nas fileiras de cada fator seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas (p<0,05) segundo teste LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação (MOA) do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores
ns, não significativo

A seguinte medição de biomassa foi em máximo perfilhamento (MP), com os manejos da água a pleno e aplicada à adubação parcelada. As plantas continuavam no período vegetativo com pleno perfilhamento e a variabilidade foi menor que na medição anterior, em torno de 20%. Nenhum dos órgãos teve diferenças estatísticas (Tabela 28), e a média da BAT foi de 3.144 kg ha⁻¹, valor compreendido entre 3.065 e 4.890 kg ha⁻¹ (para 0 a 150 unidades do N respectivamente) a que referem Fageria

e Baligar (2001). Na medição seguinte, MP, foi alcançada a maior quantidade de colmos do ciclo da cultura, com média de 1.295 colmos m^{-2} e sem diferenças estatísticas entre os tratamentos (Tabela 28).

O crescimento das plantas neste período não foi influenciado nem por MOA nem pelos diferentes manejos da água (Tabela 28).

4.7.1.3 Estádio reprodutivo

A terceira medição da biomassa correspondeu ao período reprodutivo, 21 dias após de R1 e coincidente com o estágio R2 nos tratamentos com inundação. O propósito foi avaliar, após de R1, a aplicação do resto do N no tratamento AP. Nos 33 dias transcorridos a cultura teve um crescimento muito importante e houve diferenças significativas ($p < 0,05$) da BAT entre Ic em relação à In e AS, mas não entre momentos de aplicação do N (Tabela 29). Por tanto, teve influencia o manejo da água, mas não a adubação nas diferenças encontradas.

No estágio R2 a folha bandeira está em processo de plena expansão e pelo tanto a componente BFV correspondeu à máxima do ciclo, sendo semelhante em todos os tratamentos (Tabela 29). Neste estágio começou o processo de envelhecimento das folhas inferiores, porquanto foi determinada a BFS. Essa componente incluiu a bainha da folha e não teve diferenças estatísticas entre tratamentos, mas sua variabilidade foi muito elevada (Tabela 29), representando o 6% da BAT. Os dois órgãos que tiveram diferenças significativas ($p < 0,05$), e que explicariam as diferenças da BAT, foram BB+C e N°colmos. O primeiro também entre Ic e os outros manejos da água, entanto na segunda componente foi entre AS e In, sendo este último o manejo que menor N°colmos teve neste estágio (Tabela 29). Devido ao leve atraso fenológico do manejo AS houve menor crescimento da panícula e, devido a ela estar no interior da bainha da folha bandeira, nesse estágio foi computada como parte da BB+C. Em AS isso significou menor biomassa e foi o que teve maior impacto na BAT, antes que o N°colmos, explicando assim as diferenças em relação à Ic.

Quanto ao manejo In, os resultados indicaram um aceleração da mortandade de perfilhos, porém, não tivera diferenças na fenologia segundo escala de Counce et al. (2000). Menor quantidade de colmos significou menor BB+C, que foi estatisticamente diferente ($p < 0,05$) a Ic, além de representar, neste estágio, 64%

da BAT, média dos tratamentos, devido a ser incluída a panícula. No entanto, a BFV representou só 29% da BAT, porquanto a menor quantidade de colmos em In não teve impacto estatístico na BFV, embora esta componente haja sido menor que Ic (Tabela 29). O anterior explicaria as diferenças de BAT entre In e Ic.

O atraso fenológico do manejo AS em relação à Ic foi evidenciado também considerando a TCBB+C dividido o N°colmos, resultando em 0,024 e 0,030 g d⁻¹ colmo⁻¹ para AS e Ic respectivamente, no entanto em Ic foi intermédia, com 0,027 g d⁻¹ colmo⁻¹.

Não houve diferenças estatísticas entre momentos de aplicação do N para nenhuma das componentes avaliadas em R2 (Tabela 29), indicando que aquele macronutriente esteve disponível para as plantas no momento de máxima absorção.

A quarta medição da biomassa correspondeu à R6 da escala de Counce et al. (2000), 6 dias após do início da floração (ou R4 da mesma escala). Foram feitas em duas oportunidades, com uma semana de diferença, devido ao atraso na fenologia em AS, mas foram analisadas em conjunto. Neste estágio as plantas do manejo AS tiveram deficiência hídrica, como já foi mencionado em tópico anterior. As manifestações disso, além da menor ETr, foram menor altura da planta, menor BFV e BP e maior BFS. Em relação à altura, ela foi medida desde a superfície do solo até o extremo expandido da folha bandeira. Em AS, as plantas tiveram, em média, 0,25 m menos que em inundação (Figura 43), explicado por o menor alargamento dos entrenós e menor comprimento da folha bandeira, 20 cm em AS e 39 cm em inundação.

A BFV de todos os tratamentos declinou em relação às medições anteriores, sendo muito menor sua proporção respeito à BAT (média de 18%) devido à senescência das folhas inferiores, ao engrossamento e alongação do colmo e ao crescimento da panícula. Houve diferenças significativas ($p < 0,05$) de BFV entre AS e os manejos com inundação (Tabela 29), explicadas por um menor tamanho, especialmente da bandeira, e menor quantidade de lâminas verdes, entre 4 a 5 em inundação e entre 3 a 4 em AS.

Em contraposição, a BFS foi significativamente diferente ($p < 0,05$) em AS (Tabela 29), produto de uma maior quantidade de folhas senescentes em relação aos tratamentos com inundação (em média 1 por perfilho). A proporção de BFS em relação à BAT (média de 13%) foi semelhante à proporção de BFV. A soma da BFV

e BFS em R4 representou 31% da BAT, no entanto em R2 essa proporção foi 35%, demonstrando a declinação dos órgãos vegetativos.

Figura 43 – Colmos no estágio R6 da escala de Counce et al. (2000) para o manejo aspersão, esquerda, e inundação, direita

A média da componente BB+C em R6 foi semelhante a media da medição em R2 (9.635 vs 9.787 kg ha⁻¹), ainda que as panículas não formassem parte desta componente e diminuiu notavelmente o N°colmos em todos os tratamentos (Tabela 29). Porém, foram diferentes segundo os tratamentos e, no caso de AS e In, BB+C aumentou, no entanto em Ic diminuiu (Tabela 29).

A nova componente avaliada foi BP, sendo que em R6 alguns grãos já começaram o processo de enchimento e a maioria das panículas tinham exercício completa.

Entre MOA não houve diferenças em BP, mas foram significativas ($p < 0,05$) entre os manejos da água (Tabela 29). AS foi o tratamento com menor BP e, devido à componente NPan foi levemente maior aos manejos com inundação.

Os atrasos ou adiantamentos no crescimento nos estádios anteriores, refletidos na componente BAT, foram equiparados em R6 e seus valores resultaram muito semelhantes (Tabela 29). Em AS, a menor BFV foi compensada com maior

BFS e, como os demais órgãos foram estatisticamente semelhantes, por isso a BAT não foi diferente aos outros manejos.

Tabela 29 – Evolução biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa bainha e colmo (BB+C), biomassa de folha seca (BFS), biomassa de panícula (BP), número de colmos (Nºcolmos) e panículas (NPan) para o estágio reprodutivo do arroz dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In), safra 2011-12, San Javier, Argentina

DAS	Componente	MOA		Manejos da água			Fonte de variação			
		AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	CV
88- R2	BAT (kg ha ⁻¹)	14.854	15.746	14.443 a	17.235 b	14.222 a	ns	*	ns	14,4
	BFV (kg ha ⁻¹)	4.255	4.630	4.146	4.919	4.262	ns	ns	ns	16,8
	BFS (kg ha ⁻¹)	749	1.100	819	1.078	880	ns	ns	ns	36,1
	BB+C (kg ha ⁻¹)	9.587	9.988	9.404a	10.991b	8.967a	ns	*	ns	14,5
	Nºcolmos m ⁻²	869	985	1.000 a	940 ab	841b	ns	*	ns	15,3
	NPan m ⁻²	624	686	696	641	627	ns	ns	ns	12,1
103 – R6 (1)	BAT (kg ha ⁻¹)	18.569	20.722	19.789	19.153	19.994	ns	ns	ns	16,7
	BFV (kg ha ⁻¹)	3.380	3.555	2.824a	3.821b	3.759b	ns	*	ns	21,2
	BFS (kg ha ⁻¹)	2.271	2.898	3.056a	2.317b	2.382b	ns	**	ns	21,2
	BB+C (kg ha ⁻¹)	8.820	10.451	10.493	8.839	9.573	ns	ns	ns	22,7
	BP (kg ha ⁻¹)	4.098	3.818	3.416a	4.176b	4.280b	ns	*	ns	18,6
	NPan m ⁻²	624	686	696	641	627	ns	ns	ns	12,1

Nota: Valores médios nas fileiras de cada componente seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas (p<0,05) segundo teste LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação (MOA) do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores, DAS – Dias a semeadura

* significância F com p<0,05; ** significância F com p<0,01; ns, não significativo

(1) Corresponde 103 DAS para os tratamentos com inundação

4.7.1.4 Colheita

Na colheita a BPa agrupou as componentes BFV, BFS e BB+CA. As componentes BAT, BP e BPa dos manejos In e Ic foram quase iguais, no entanto tiveram diferenças significativas (p<0,001) com AS. O estágio de maturidade fisiológica foi alcançado 12 dias após de R6. As diferenças da BP foram produto tanto da menor NPan (Tabela 30) como a menor massa individual das panículas, que foram 1,67, 1,95 e 1,91 g pan⁻¹ para os tratamentos AS, Ic e In respectivamente.

O estresse também impactou na esterilidade das espiguetas, aspecto que será desenvolvido no tópico de produtividade.

Não houve diferenças estatísticas entre MOA, nem interação entre Pp e os manejos de água (Tabela 30). Isso indicaria que a disponibilidade do N em cada um dos estádios foi adequada para satisfazer os requerimentos da planta. A falta de interação entre aplicações de N e manejos de irrigação também foram encontradas por outros autores (Beecher et al., 2006; Vries et al., 2010; Belder et al., 2004).

Tabela 30– Evolução biomassa aérea total (BAT), biomassa da palha (BP), biomassa de panícula (BP), número de panículas (NPan) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina

DAS	Componente	MOA		Manejos da água			Fonte de variação			
		AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	CV
127 - Colheita	BAT (kg ha ⁻¹)	17.560	18.038	14.773a	19.248b	19.381b	ns	***	ns	11,5
	BP (kg ha ⁻¹)	8.656	8.385	7.021a	9.182b	9.359b	ns	***	ns	12,5
	BP _a (kg ha ⁻¹)	8.908	9.653	7.752a	10.067b	10.022b	ns	***	ns	12,4
	NPan m ⁻²	499	503	464a	515b	525b	ns	**	ns	6,8

Nota: Valores médios nas fileiras de cada componente seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação (MOA) do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores

significância F com $p < 0,01$; * significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

4.7.1.5 IAF e AFE

Foi representada tanto a evolução da BFV (Figura 44) como do IAF (Figura 45) devido a ambas variáveis estarem fortemente relacionadas. O manejo AS foi o que menor BFV teve em todo o ciclo da cultura, no entanto Ic foi o mais alto. Para IAF o comportamento foi semelhante, maior Ic e menor AS, no entanto In teve interação entre as datas de medição (Figura 45).

Na primeira medição de IAF (MP) houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre os manejos de inundação e AS (Figura 44), porém não foram diferentes as biomassas (Figura 44). Na Figura 46 estão representadas os valores de IAF e BFV do estágio MP, na qual, ainda que os valores tenham alta dispersão, pode se observar que no manejo AS os resultados de IAF foram nitidamente menores que nos manejos com inundação, a valores de BFV semelhantes.

A curva de crescimento das lâminas alcançou o máximo valor no estágio R2 em todos os tratamentos, onde o manejo Ic foi maior, embora sem diferenças

estatísticas com AS e In (Figura 44). Neste estágio a folha bandeira está em processo de plena expansão e, além dela, outras quatro lâminas verdes, em média, estão totalmente expandidas e por isso a componente BFV correspondeu à máxima do ciclo. A maior massa das lâminas foi correspondida com uma maior superfície, porquanto em R2 também foi máximo o IAF e também não houve diferenças estatísticas entre tratamentos (Figura 45).

Segundo a gráfica BFV-IAF, no estágio MP houve grande dispersão dos valores, sem nenhuma tendência (Figura 46). Para um melhor ajuste, deveram-se transformar os valores de biomassa a assimilados (matéria orgânica), prévia correção da fração mineral presente nas lâminas.

Figura 44 – Evolução da biomassa de folha verde (BFV) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias após a semeadura (DAS) na safra 2011-12, San Javier, Argentina. IP início do perfilhamento, MP máximo perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000)

No estágio R2 houve relação linear BFV-IAF para todos os manejos da irrigação (Figura 47), sendo o coeficiente da reta em torno a 2. Neste estágio foram selecionadas lâminas dos diferentes tratamentos e diversos tamanhos para avaliar eq. (38), obtendo-se o valor de 0,86 para k , com um nível de significância de $p < 0,0001$. Yoshida (1981) refere valores de k entre 0,67 a 0,8, segundo estádios de crescimento. O maior valor de k para o cultivar Puitá INTA deve-se provavelmente a um maior comprimento das lâminas superiores. O comprimento e largura média das lâminas foram 37,6 e 1,1 cm respectivamente. Thakur et al. (2011) referem comprimentos e largura médios de lâminas de 65,3 e 1,8 cm respectivamente, em

arroz ANA de ciclo intermédio na Índia, embora os valores de IAF em R4 foram em torno de 4.

Figura 45 – Evolução índice de área foliar (IAF) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias após a semeadura (DAS) na safra 2011-12, San Javier, Argentina. MP máximo perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Letras diferentes em cada estágio indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

A partir de R2 acrescentou-se a senescência das folhas, e tanto a BFV (Figura 44) como o IAF (Figura 45) declinaram na seguinte medição (R6). Isto se deve a vida útil das folhas individuais difere segundo sua posição, sendo que as inferiores têm menor vida útil que as superiores, devido ao deslocamento de amido, açúcar e proteínas às folhas superiores (YOSHIDA, 1981).

O maior impacto da senescência das lâminas foi em AS, já que neste estágio teve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) tanto em IAF como da BFV em relação aos manejos com inundação. Também em R6 a relação BFV com IAF foi linear e com alto coeficiente de determinação R^2 (Figura 48). A equação de regressão indica que cada tonelada de BFV aporta 2 unidades de IAF, no intervalo de BFV entre 1,5 a 5,5 Mg ha^{-1} .

No estágio MP não houve relação linear entre IAF e BFV (Figura 46) devido às lâminas estar em plena expansão, mas com baixa biomassa, portanto o AFE foi elevado (Figura 49). Além disso, neste estágio houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre AS e os manejos com inundação, ao igual que o IAF, devido à em AS houve muitas lâminas pequenas (jovens) com menor superfície, ainda que em todos

os manejos da água sua massa fossem similares. Ou seja, menor AF das lâminas em AS, com a mesma massa, ou que significou menor AFE.

Figura 46 – Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para aspersão (AS) e inundação no estágio máximo perfilhamento (MP) da safra 2011-12, San Javier, Argentina

Figura 47 – Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para aspersão (AS) e inundação no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2011-12, San Javier, Argentina

Figura 48 – Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para aspersão (AS) e inundação no estágio R6 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2011-12, San Javier, Argentina

No estágio R2, tanto o IAF como a BFV foram máximos, porquanto a AFE resultou menor, quase a metade que em MP e sem diferenças entre manejos da água (Figura 49). Outro estágio com diferenças estatísticas de IAF foi R6, mas neste também houve diferenças na BFV, porquanto ao se realizar o quociente entre AF e BFV para o cálculo da AFE, ficaram com valores semelhantes. Também pode se

observar na Figura 48 que a tangente da reta da relação IAF-BFV corresponde a AFE, só que ao valor 2,08 deve-se multiplicar por 10 para levar a unidades homogêneas.

Figura 49- Evolução da área foliar específica (AFE) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2011-12, San Javier, Argentina. MP máximo perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

4.7.1.6 Produtividade

Os resultados estiveram em concordância com o comportamento dos diferentes tratamentos durante o ciclo. A interação entre MOA x Manejos da água não foi significativa e houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre AS e os manejos com inundação (Figura 50), ao igual que a componente BP no estágio R6 e na colheita e com redução de PG de 24%.

As outras componentes que tiveram diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em AS com relação aos manejos com inundação foram FE e NEt (Figura 51). Ambas são importantes porque refletem as condições desenvolvidas no ciclo. O cultivar Puitá INTA tem baixa quantidades de espiguetas por panícula (NEt), entre 70 e 100, ainda que altos porcentagem de FE em condições normais. Em Entre Ríos, Quintero (2009) refere para esta variedade o NEt médio de 96, no entanto Weber et al. (2003), para uma variedade similar (IRGA 417) cultivada no Sul do Brasil, uma média de 69. Quanto à esterilidade, Quintero (2009) refere média de quatro safras para Puitá INTA, 11,9%, sendo um dos cultivares com menor esterilidade. Esse valor

foi semelhante ao obtido nos tratamentos com inundação que tiveram, em média, 90% de FE.

Figura 50 - Produtividade (PG) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Figura 51 - Fertilidade de espiguetas (FE) e número de espiguetas totais (NEt) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes para cada variável indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

As condições de Tmax e Tmin da safra 2011-12 foram adequadas para conseguir a maior FE, segundo já foi analisado no tópico 4.1.1 Outra causa de esterilidade das espiguetas seria a baixa radiação solar durante o enchimento (FAGERIA, 2007). Devido aos valores de FE nos manejos com inundação, a RG no período foi de 294 MJ m^{-2} , resultando adequada.

A componente M1000 foi semelhante e sem diferenças estatísticas em todos os tratamentos (Tabela 31), indicando uma grande estabilidade nesta componente.

Quanto a IC, também não houve diferenças nem entre MOA nem entre manejos da água (Tabela 31). Somente devido ao arredondamento de decimais, a média entre AP e AT não coincide exatamente com a médias dos manejos da água. A falta de diferença ocorreu apesar da baixa variabilidade desta componente, e indicaria que a diminuição da produtividade em AS (manejo que teve diferenças significativas respeito à inundação) foi acompanhada com a mesma proporção de diminuição da BAT, sendo a deficiência hídrica responsável disso. Em Entre Ríos a média de IC foi 0,52 para o Puitá INTA CL, maior aos obtidos em San Javier (QUINTERO, 2009).

Tabela 31 – Índice de colheita (IC) e massa de 1000 grãos (M1000) dos tratamentos adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo da aplicação (MOA) e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina

Componente	Tratamentos					Fonte de variação			
	AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	CV
IC	0,46	0,43	0,44	0,44	0,44	ns	ns	ns	6,1
M1000 (g)	22,5	23,6	23,3	23,0	22,7	ns	ns	ns	4,7

Nota: Valores médios nas fileiras de cada componente seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores, ns, não significativo

A equação de PG em base aos componentes da produtividade (eq. 41) foi testada em todas as repetições do experimento e permitiu realizar ajustes quando se apartaram dos valores determinados a campo. Houve diferenças devido à seleção das 50 panículas para estimar as componentes da produtividade, com tendência a escolher aquelas dos colmos principais, que têm maior tamanho. Devido a M1000 ser muito estável, foi ajustado o NEf através de um coeficiente de minoração, cujo valor médio foi 0,85.

4.7.2 Evolução da biomassa aérea - Safra 2012-13

Na safra 2012-13 foram feitas quatro determinações de biomassa aérea, a inicial em mediados do perfilhamento (MeP) com média de 6 folhas no colmo principal, dias após do início dos tratamentos de irrigação e adubação com N, e as seguintes em R2, R6 segundo escala de Counce et al. (2000) e a final na colheita. De igual modo que na safra anterior foi válido a suposição de homocedasticidade devido ao fato de que em cada medição foram extraídas plantas aleatoriamente, cuidando de não obtê-las próximas a medições prévias.

4.7.2.1 Estádio vegetativo

O análise estatístico na emergência indicou alta variabilidade no número de plantas (31,33%), sem diferenças entre blocos, porquanto a condição inicial foi semelhante entre tratamentos.

No estágio MeP, a componente BAT apresentou diferenças estatísticas tanto no fator DA quanto os manejos da água e devido a que não houve interação entre fatores, serão analisados individualmente. O manejo que menor desempenho teve foi Ic, com diferenças ($p < 0,05$) em relação a AS (Tabela 32). No análise da ETr, no período vegetativo ocorreu à situação inversa, isto é, houve maior ETr nos tratamentos com inundação, devido provavelmente à maior componente da Ev. As diferenças de BAT foram pela BFV, que também teve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre os mesmos tratamentos, no entanto nem BB+C nem N°colmos foram diferentes (Tabela 32).

Na procura de razões das diferenças da biomassa, foram analisadas as diferenças mínimas significativas (DMS), segundo teste LSD com $p < 0,05$, para BAT e BFV. Estas resultaram 175,4 e 111,5 kg ha⁻¹ respectivamente, devido à baixa variabilidade da amostragem inicial de biomassa (9 a 12%). No caso da BAT, entre AS e Ic houve uma diferença de 176 kg ha⁻¹, apenas maior que a DMS. No entanto em BFV, também entre AS e Ic, a diferença foi de 129 kg ha⁻¹, um pouco maior que a DMS desta componente. Outra razão seria a disponibilidade diferente de N a partir das diferentes condições de aeração em AS e Ic.

A semelhança de N°colmos entre os tratamentos de irrigação indicaria que não houve restrições de água nem nutrientes para seu desenvolvimento, incluso Ic foi o maior de todos (Tabela 32). Também não os blocos tiveram diferenças estatísticas, corroborando a aleatoriedade da sua seleção. A componente BB+C

representou o 53% da BAT, sendo principalmente bainha, devido ao colmo antes da etapa reprodutiva ainda não começou a alongação e o restante foi BFV.

Houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em MeP em todas as componentes, entre a testemunha e as doses T1 e T2 (Tabela 32). O N é fundamental na etapa de perfilhamento ativo para gerar uma quantidade suficiente de panículas (YOSHIDA, 1981, FAGERIA, 2007, QUINTERO, 2009). O N°colmos em T0 foi 18% menor que a média dos tratamentos T1 e T2, sendo essa a causa principal da diminuição da BAT, devido à biomassa aérea média de cada colmo, em T0, foram $0,2 \text{ g colmo}^{-1}$, maior a T1 e T2 ($0,17 \text{ g colmo}^{-1}$), que resultaram iguais.

Tabela 32 – Biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa de bainha e colmo (BB+C) e número de colmos (N°colmos) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In), no estágio vegetativo do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

DAS	Componente	T0	T1	T2	AS	Ic	In	Fonte de variação			
								A	M	AxM	CV
47-MeP	BAT (kg ha^{-1})	1.462a	1.806b	1.938b	1.827a	1.650b	1.729ab	***	*	ns	9,3
	BFV (kg ha^{-1})	659a	871b	932b	882a	753b	828ab	***	*	ns	12,5
	BB+C (kg ha^{-1})	802a	935b	1006b	945	897	901	**	ns	ns	9,3
	N°colmos m^{-2}	846a	1.011b	1.059b	985	998	934	**	ns	ns	12,2

Nota: Valores médios nas fileiras para cada fator e componente, seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

A – Fator Dose de Adubação do N, M – Fator Manejo da água, A x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

4.7.2.2 Estádio reprodutivo

Na segunda medição (R2) todas as componentes avaliadas tiveram interação significativa entre fatores, exceto BB+C. A diferença da safra 2011-12, não houve quantidade significativa de folhas secas, apenas nas pontas das lâminas mais velhas houve uma incipiente senescência.

Devido à BAT expressar o comportamento do conjunto dos órgãos vegetais da planta de arroz, a interação determinada nesta componente seria replicável ao resto dos órgãos. O tratamento Ic foi quem originou a interação, já que em T0 teve os menores valores, ainda que sem diferenças estatísticas com os demais manejos da água (Figura 52). No entanto, em T1 acrescentou-se notavelmente (incremento médio de $4,33 \text{ Mg ha}^{-1}$), embora só com diferenças estatísticas ($p < 0,05$) respeito à

In, e no tratamento T2, ao contrário, diminuiu em 13%. Os tratamentos In e AS tiveram um comportamento semelhante, com crescimento linear da BAT em função da dose de adubação, ainda que com taxas diferentes (Figura 52). Em In, o incremento da BAT entre níveis de N foi em torno de $1,17 \text{ Mg ha}^{-1}$, no entanto que em AS foi quase o duplo, em torno de $2,28 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Figura 52 – Biomassa aérea total (BAT) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha^{-1} de N e T2: 87 kg ha^{-1} de N) no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças estatísticas ($p < 0,05$) segundo teste LSD ($p < 0,05$)

Figura 53 - Biomassa de folhas verdes (BFV) em R2 para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha^{-1} de N e T2: 87 kg ha^{-1} de N) no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças estatísticas ($p < 0,05$) segundo teste LSD ($p < 0,05$)

O comportamento da BFV foi análogo à BAT, sendo Ic o manejo que ocasionou a interação. De igual modo, AS e In tiveram incrementos lineais (Figura

53), com aumento médio entre níveis de N de 567 kg ha^{-1} para In e aproximadamente o duplo em AS ($1,08 \text{ Mg ha}^{-1}$). As médias da BFV para os manejos AS, Ic e In foram $3,96$, $3,67$ e $3,53 \text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente e, considerando a média geral dos tratamentos, a BFV representou em torno a 40% da BAT. Do mesmo modo que na BAT, que a interação seja significativa implica que o manejo Ic teve influencia nas doses de N aplicadas.

A componente N°colmos também teve interação significativa entre fatores, com comportamento variável dos manejos Ic e In (Figura 54). Para interpretar os resultados, maior N°colmos significa menor mortandade. O manejo AS teve valores semelhantes entre T0 e T1, e uma diminuição da mortandade significativa ($p < 0,05$) em T2, alcançando o máximo neste estágio ($665 \text{ colmos m}^{-2}$). No manejo AS, a mortandade média de colmos respeito à MeP, para T2, T1 e T0, foi 32, 43 e 45% respectivamente. O manejo Ic foi diferente, em T0 houve um incremento significativo da mortandade ($p < 0,05$) respeito a T1 e T2 (Figura 54) e, em relação à MeP, foram 36, 37 e 45% para de T2, T1 e T0 respectivamente. O manejo In foi muito irregular, em T0 teve mortandade semelhante a AS, em T1 similar a Ic e em T2 teve a maior mortandade, com diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em relação a AS (Figura 54).

Figura 54 – Número de colmos ($\text{N}^\circ\text{colmos m}^{-2}$) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha^{-1} de N e T2: 87 kg ha^{-1} de N) no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD ($p < 0,05$).

A componente BB+C não teve interação significativa entre fatores. Também não houve diferenças estatísticas entre manejos da água, sendo a média de 5,43 Mg ha⁻¹. Esse valor representa 60% da BAT, maior que no estágio MeP devido à inclusão da panícula na componente BB+C. Houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre T0 e os outros tratamentos (Figura 55), em torno a 38%. Dividindo a BB+C por N°colmos de cada nível de N, resulta que as diferenças são menores, em torno a 11,5% (0,8 g colmo⁻¹ para T0 e 1,0 g colmo⁻¹ para T1 e T2). De acordo com isto, a principal razão da diferença da BB+C no nível T0 foi a maior mortandade de perfilhos.

Para melhor interpretação dos resultados, foi isolado o efeito do perfilhamento, isto é, a BFV e a BAT foram divididas pelo N°colmos. No caso de AS, em T1 houve um incremento significativo ($p < 0,05$) no crescimento da biomassa das lâminas por colmo em relação a T0 (Figura 56). Relacionando o anterior com a mortandade de perfilhos, significaria que a maior quantidade de N em T1 não foi suficiente como para atenuar as perdas de perfilhos (Figura 54.), embora permitisse acrescentar a biomassa das lâminas. Com a dose T2, em AS se manteve o crescimento da biomassa das lâminas (Figura 56), além de permitir diminuir a mortandade dos perfilhos (Figura 54.).

Figura 55 – Biomassa de bainha e colmo (BB+C) para os tratamentos de adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier,

Argentina Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD ($p < 0,05$)

Em Ic ocorreu o contrário de AS, isto é, a dose T1 permitiu incrementos significativos ($p < 0,05$) na biomassa das lâminas individual dos colmos (Figura 56) e também atenuar sua mortandade (Figura 54), no entanto com a dose T2 foi atenuada a mortandade de perfilhos (Figura 54), embora às lâminas tivessem menor biomassa (Figura 56), resultando mais colmos ainda que com menor biomassa. Isto coloca em evidência o contraste que houve no manejo Ic no qual, com menor dose de N, T1 teve melhor comportamento que T2.

No manejo In ocorreu uma situação diferente às anteriores. Com a dose T1 diminuiu significativamente ($p < 0,05$) a mortandade de perfilhos em relação a T0 (Figura 54), embora a biomassa das lâminas não conseguisse se acrescentar (Figura 56), isto é, mais colmos embora com menor biomassa nas lâminas. Com a dose T2, a diferença de AS e Ic, houve mortandade de colmos quase igual que em T0 (Figura 54), mas aumentou significativamente ($p < 0,05$) a biomassa das lâminas (Figura 56).

A Figura 57 representa a biomassa aérea total média individual dos colmos, mostrando que a tendência dos tratamentos foi quase igual que à biomassa das lâminas, indicando que a componente BB+C dos colmos não incidiu na variabilidade antes mencionada e foi similar em todos os tratamentos, exceto na testemunha.

Figura 56 – Biomassa de folha verde (BFV) média dos colmos para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de

N) no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD ($p < 0,05$)

Figura 57 – Biomassa aérea total (BAT) média dos colmos para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) no estágio R2 da escala de Counce et al. (2000) da safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com distintas letras indicam diferenças estatísticas segundo teste LSD ($p < 0,05$)

A terceira medição da biomassa correspondeu à R6 da escala de Counce et al. (2000), com início de enchimento dos grãos superiores e oito dias após do início da floração. Nesta data foram incorporadas as componentes BFS e BP. Deve destacar-se que as medições não conseguiram fazer-se no mesmo dia, estava planejado completar em dois dias, mas ocorreram chuvas que impossibilitaram isso. Como as plantas deviam manter-se frescas para as leituras do AF, houve defasagem entre as primeiras (T2) e as últimas (T0) de quatro dias, o que significou um maior enchimento das panículas da testemunha. Ainda que a análise estatística foi feita considerando o conjunto dos dados, será discutido a implicação da defasagem. Outra distinção importante é que, neste estágio, os valores da BAT alcançaram, em média, só 70% da BAT correspondente ao mesmo estágio da safra 2011-12.

Do mesmo modo que fora descrito na safra anterior, em R6 as folhas vão envelhecendo, fica menor quantidade de lâminas verdes, aumenta as folhas secas e também perdem proporção em relação à BAT (menor quantidade e menor massa das lâminas). Nesta medição houve quatro lâminas, incluindo a bandeira.

Houve diferenças significativas ($p < 0,05$) de BFV entre AS e Ic (Tabela 33), continuando a tendência da segunda medição de biomassa, na qual AS superou aos manejos com inundação.

Quanto a DA, a BFV em T0 teve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em relação a T1 e T2, sendo a média deles 60% superior a T0. Novamente, relacionando com a BP, T0 foi maior a T1 e sem diferenças estatísticas com T2 (Tabela 33). Por um lado os grãos foram enchidos adequadamente, sem diferenças com as doses de adubação, e por outro a massa das lâminas foi 40% menor. Uma possível explicação a isto seria que, em condições de menor absorção de N pelas raízes, esse macronutriente seria provido em boa parte pelas lâminas verdes, o que acelerou sua senescência (FAGERIA, 2007). Corroborar este suposto a diminuição significativa (25%, $p < 0,05$) na componente BB+C da testemunha (Tabela 33), quando em R2 a diferença unitária desta componente (no nível de colmo) foi só 10%. Além disso, o fato que houve quatro dias de defasagem nas medições pôde haver tido alguma influência no maior deslocamento, particularmente em T2 que foi o primeiro tratamento medido, devido às massas individuais médias das panículas foram 0,89, 0,86 e 0,73 g panícula⁻¹ para T0, T1 y T2 respectivamente.

Tabela 33 – Biomassa aérea total (BAT), biomassa folha verde (BFV), biomassa de bainha e colmo (BB+C), biomassa de folha seca (BFS), biomassa de panícula (BP) e número de panículas (N°Pan) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) no estágio R6 da escala de Counce et al. (2000) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

DAS	Componente	Tratamentos						Fonte de variação			
		T0	T1	T2	AS	Ic	In	A	M	AxM	CV
102 – R6	BAT (kg ha ⁻¹)	11.884a	15.121b	14.243b	13.874	13.291	14.083	***	ns	ns	8,2
	BFV (kg ha ⁻¹)	1.374a	2.289b	2.287b	2.330b	1.768a	1.851ab	**	*	ns	25,8
	BFS (kg ha ⁻¹)	876	1015	948	872	991	976	ns	ns	ns	25,3
	BB+C (kg ha ⁻¹)	5.040a	6.718b	6.732b	6.139	5.929	6.422	***	ns	ns	14,0
	BP (kg ha ⁻¹)	4.595ab	5.098b	4.277a	4.533	4.604	4.833	*	ns	ns	13,2
	N°Pan m ⁻²	517a	591b	583b	568	554	589	*	ns	ns	11,3

Nota - Valores médios nas fileiras para cada fator e componente, seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

A – Fator Dose de Adubação do N, M – Fator Manejo da água, A x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

Devido aos menores valores de BFV e BB+C em T0, a BAT da testemunha também foi significativamente menor ($p < 0,05$) aos tratamentos T1 e T2 (Tabela 33). No mesmo sentido, a componente BFS do T0 foi menor, ainda que sem significância estatística, a T1 e T2, sendo que em T0 a proporção da BFS em relação à biomassa total das folhas foi 39%, no entanto em T1 y T2 de 30%. Isto indicaria um aceleração da senescência em T0. Quanto aos manejos, destaca-se AS que teve uma proporção menor de BFS (27%) aos manejos com inundação (média de 35 %).

A componente N°Pan não teve interação significativa e houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre T0 e as doses T1 e T2, embora sem diferenças entre os manejos da água (Tabela 33), com média geral de 567 N°Pan m⁻².

4.7.2.3 Colheita

O estágio de maturidade fisiológica foi alcançado 12 dias após de R6, e a análise estatística indicou que a interação não foi significativa, do mesmo modo que no estágio anterior, indicando que os efeitos sob a mineralização do N devido aos diferentes manejos da água, determinados na primeira etapa do estágio reprodutivo, não continuaram.

Não houve estresse (hídrico ou térmico) porquanto as diferenças entre manejos da água são produto dos estádios anteriores. Na componente BP está incluída a massa da ráquis, que representou, em média, 8% da panícula.

Deve destacar-se o importante crescimento da BAT entre R6 e R8, situação diferente à safra anterior. Houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) na componente BP entre AS e In (Tabela 34). Em relação à N°Pan, houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre Ic e In, embora isso não repercutisse na BP, que foram semelhantes (Tabela 34). A razão disso seria que a BPa foi inversa entre esses manejos, isto é, em Ic foi maior que em In, porquanto individualmente os colmos tiveram, em média, mais massa e isso permitiu deslocar mais assimilados à panícula. Além disso, em R6 também N°Pan do manejo Ic foi menor a In, ainda que sem diferenças estatísticas, devido provavelmente a uma maior variabilidade na amostragem (Tabela 33).

A componente BAT foi quase igual entre os manejos da água, embora algumas componentes por separado hajam sido diferentes. No caso de N°Pan, os

manejos que tiveram menor quantidade de panículas, foram compensados com maior massa individual dos colmos.

Por outro lado, nos tratamentos DA houve nítido impacto na testemunha, já que todas as componentes tiveram diferenças significativas ($p < 0,05$) em relação a T1 e T2. O que maior incidência teve foi a menor quantidade de panículas (Tabela 34), mantendo as diferenças estatísticas ($p < 0,05$) da medição anterior em relação à Ic e In. Mas também teve influência a massa individual das panículas, sendo que em R6 a testemunha foi a maior de todas, no entanto em R8 foi ao contrário, 1,54 g panícula⁻¹ para T0 e 1,65 e 1,76 g panícula⁻¹ para T1 y T2 respectivamente.

Em relação a T1 e T2, na componente BP as diferenças não foram significativas, ainda que T2 superou a T1 em 577 kg ha⁻¹ (a DMS segundo teste LSD foi de 642 kg ha⁻¹), sendo uma diferença exígua. Em contraste, houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) na BPa, o que significou que também houvera diferenças significativas na BAT (Tabela 34). Devido a NPan ser quase igual entre ambos os tratamentos, os colmos individuais do T2 tiveram maior massa, e provavelmente com maior quantidade de assimilados que deveriam ser deslocados às panículas.

Tabela 34 – Biomassa aérea total (BAT), biomassa de panícula (BP), biomassa de palha (BPa) e número de panículas (N°Pan) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

DAS	Componente	Tratamentos						Fonte de variação			
		T0	T1	T2	AS	Ic	In	A	M	A x M	CV
125 – Colheita	BAT (kg ha ⁻¹)	16.112a	20.047b	21.892c	19.158	19.555	19.337	***	ns	ns	7,3
	BP (kg ha ⁻¹)	8.114a	9.676b	10.254b	8.956a	9.441ab	9.646b	**	*	ns	6,9
	BPa (kg ha ⁻¹)	7.998a	10.371b	11.638c	10.202	10.114	9.691	***	ns	ns	9,6
	N°Pan m ⁻²	524a	583b	585b	563ab	545a	583b	**	*	ns	5,7

Nota: Valores médios nas fileiras para cada fator e componente, seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

A – Fator Dose de Adubação do N, M – Fator Manejo da água, A x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; ** significância F com $p < 0,01$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

4.7.2.4 IAF e AFE

Desde a primeira medição do IAF (MeP), já houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre T0 e T2, no entanto não foram tão amplas com T1 (Figura 58). Quanto aos manejos da água, houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre Ic e As

(Figura 59), do igual modo que com BFV (Tabela 32). A DMS de IAF foi de 0,47, no entanto entre Ic e AS a diferença foi apenas superior, de 0,51.

Também em R2 alcançou-se o maior IAF do ciclo da cultura, com diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos com N (Figura 58) e também entre AS e os manejos com inundação (Figura 58). Em contraste com as componentes BAT, BFV e N°colmos m^{-2} , neste estágio não houve interação significativa entre fatores.

Na última medição de IAF (R6) os tratamentos T1 e T2 foram similares e estadísticamente diferentes ($p < 0,05$) a T0 (Figura 58), no entanto o manejo AS também se diferenciou dos manejos Ic e In (Figura 59).

Na apresentação dos resultados da BFV em R6 foi mencionado que a média de T1 e T2 foi 60% maior a T0, proporção que se manteve com o IAF. Por outra lado, no manejo AS também foi maior a BFV em relação à Ic e In, reafirmando com ambos os casos a linearidade da relação IAF-BFV no período reprodutivo (Figuras 60 e 61).

Figura 58 - Evolução índice de área foliar (IAF) para testemunha T0, apenas com adubação na sementeira; T1: 50 kg ha^{-1} de N e T2: 87 kg ha^{-1} de N segundo dias a sementeira (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Letras diferentes em cada estágio indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Figura 59 - Evolução índice de área foliar (IAF) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Letras diferentes em cada estágio indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Figura 60 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para o conjunto dos tratamentos no estágio mediados de perfilhamento da safra 2012-13, San Javier, Argentina

Figura 61 - Relação do índice de área foliar (IAF) com a biomassa de folha verde (BFV) para o conjunto dos tratamentos nos estágios R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000), safra 2012-13, San Javier, Argentina

Na estimativa da AFE, em contraste com o IAF, só houve diferenças significativas ($p < 0,05$) em R2, mas com a mesma tendência que IAF, isto é, T2 foi diferente a T1 e T0 (Figura 62), e AS superou a Ic (Figura 63). No período vegetativo AFE teve entre 18 a 20 $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ menos que na safra 2011-12, no entanto no período reprodutivo já se aproximaram.

Figura 62 - Evolução da área foliar específica (AFE) para testemunha T0, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N, segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Figura 63 - Evolução da área foliar específica (AFE) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) segundo dias a semeadura (DAS) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. MeP mediados de perfilhamento, R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000). Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Devido à alta linearidade da relação IAF-BFV, o coeficiente angular da reta (Figura 61), multiplicado por 10, representa a média da AFE no período reprodutivo.

4.7.2.5 Produtividade

As médias da BG e PG foram 8,78 e 10,00 Mg ha⁻¹ respectivamente, superando as médias das mesmas componentes da safra anterior. Porém, são valores experimentais ainda muito distantes da média da produtividade desta safra em San Javier, que foi apenas 4,5 Mg ha⁻¹. A variabilidade dos tratamentos em geral teve concordância com o comportamento durante o ciclo, mas na etapa final de enchimento dos grãos se acrescentaram as diferenças em alguns tratamentos, como no caso de AS, que teve diferença significativa ($p < 0,05$) com In (Figura 64).

Ao contrário, a diferença entre DA foram mais contrastantes (Figura 64) e significativas ($p < 0,05$). Razoavelmente, a PG de T0 foi 20% menor em relação à média de T1-T2, ainda que alcançasse valores superiores à produtividade média regional. T0 também teve diferenças significativas ($p < 0,05$) em NEt (Figura 64). Por outro lado, houve diferenças significativas ($p < 0,05$) de PG entre T1 e T2 (Figura 64), embora não as houve em BP (Tabela 34). Por outro lado a massa do raqui nesta safra representou, em média, 6% da panícula.

Figura 64 – Produtividade (PG) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes maiúsculas nos tratamentos de adubação com N e minúsculas nos manejos da água, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

A componente NEt teve pouca variação, ainda entre testemunha e os tratamentos T1 y T2 (máximo 10 espiguetas panícula⁻¹), indicando que no período do enchimento dos grãos, o destino está influenciado mais por N°Pan m⁻² antes que pelo tamanho das panículas, que permanecem relativamente constantes embora as condições ambientais e de manejo sejam diferentes. Resultados similares relacionados à baixa variabilidade das espiguetas foram obtidos por Tao et al. (2006).

A normalidade da componente FE foi testada com o teste de Shapiro-Wilks modificado (InfoStat, 2012), resultando valores muito elevados em todos os tratamentos (maior 90%), havendo diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre T0 e T1 (DA) e entre AS e os manejos de inundação, embora muito pequenas (1 a 2%), devido à baixa variabilidade desta componente (Figura 65).

Figura 65 – Número de espiguetas totais (NEt) e fertilidade de espiguetas (FE) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação continua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Nota – Valores médios de cada variável com letras diferentes maiúsculas nos tratamentos de adubação com N e minúsculas nos manejos da água, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Os valores de M1000 foram semelhantes em todos os tratamentos, com média de 23,6 g, similares aos da safra anterior, e próprio da variedade Puitá INTA. No entanto, em T0 ocorreu o contrário com IC (Tabela 35), isto é, o destino (grãos)

acumulou, em proporção, maior quantidade de assimilados produzidos pelas lâminas.

Tabela 35 – Massa de 1000 grãos (M1000) e índice de colheita (IC) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) na colheita do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

Componente	Tratamentos						Fonte de variação			
	T0	T1	T2	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	CV
M1000										
(g)	23,6	23,7	23,4	23,0	23,9	23,8	ns	ns	ns	4,1
IC	0,47b	0,45a	0,44a	0,44a	0,46ab	0,47b	*	*	ns	3,2

Nota - Valores médios nas fileiras para cada fator e componente, seguidos de letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; ns, não significativo

4.7.2.6 Análise de correlação da produtividade

Nas tabelas 48, 49, 50, 51 e 52 (ANEXO) são apresentados os resultados. M1000 não foi apresentado devido a nenhuma das safras teve correlação significativa. Outras variáveis que não tiveram correlação significativa e por isso também não estão apresentadas nas tabelas foram AFE, para nenhuma das medições feitas no ciclo da cultura e o N°colmos m^{-2} no estágio R6. As celas das tabelas sombreadas cor cinza indicam situações contrastantes entre ambas as safras. Por exemplo, o IC na safra 2012-13 não teve correlação significativa com PG, no entanto na safra anterior teve alta correlação positiva. As grandes quantidades de celas sombreadas indica muito contraste entre ambas as safras, cuja origem se deve aos diferentes agro-ecossistemas antes que a variáveis de tipo meteorológica.

A componente PG teve alta correlação positiva com N°Pan, NEt, NGf, além da BAT na colheita, em ambas as safras. Em relação ao estágio R2, teve alta correlação positiva com as componentes BFV, BAT, IAF e BB+C, também em ambas as safras, no entanto com N°colmos m^{-2} somente na safra 2012-13 teve correlação positiva significativa (Tabelas 48 e 49, ANEXO). Continuando a análise de PG, no estágio R6 teve alta correlação positiva significativa só com BFV e IAF em ambas as safras, contrastando o resto das componentes. BAT e BB+C tiveram correlação positiva significativa na safra 2012-13 e não significativa na anterior, tendo BP correlação positiva significativa na safra 2011-12 mais não significativa na seguinte (Tabelas 50 e 51, ANEXO). Quanto ao período vegetativo, a variável IAF

teve correlação positiva significativa em ambas as safras, e $N^{\circ}colmos\ m^{-2}$ foi ambivalente, teve correlação positiva significativa na safra 2012-13 e negativa, ainda que não significativa, na safra 2011-12 (Tabelas 50 e 51, ANEXO). Razoavelmente, AbNT e AbNG tiveram correlação positiva significativa em ambas as safras (Tabelas 50 e 51, ANEXO). Com relação às componentes do balanço hídrico com impacto na produtividade, Lib teve alta correlação positiva significativa em ambas as safras, embora Li_L só na safra 2011-12. ETr não teve correlação significativa nenhuma das safras (Tabela 52, ANEXO), embora, quando se agruparam todos os dados de ambas as safras, teve correlação positiva significativa (ρ igual a 0,36, $p \leq 0,01$). As três determinações de IAF e BFV tiveram correlação positiva significativa com PG, indicando a importância das lâminas, através da fotossíntese, na produtividade da cultura de arroz.

4.8 Nutrição

4.8.1 Absorção de N - Safra 2012-13

A análise da nutrição mineral começou com a safra 2012-13 para poder avaliar a condição testemunha, quase sem adubação com N. É importante destacar que o experimento foi desenvolvido em campo de produtores, com cultura de arroz e milho nos anos prévios e adubação tradicional. Isto significa pouca perturbação dos nutrientes do solo, diferentemente de áreas experimentais nas quais em anos anteriores foram desenvolvidos experimentos de adubação, o que constitui prováveis fontes de erro.

A absorção média de N pela biomassa aérea (AbNT) foi diferente estatisticamente ($p < 0,05$) entre os tratamentos T2 e T1 e entre estes e T0 (Tabela 36). A média da T0 foi de $131\ kgN\ ha^{-1}$ (sem raízes), no entanto $13,3\ kg\ N\ ha^{-1}$ foram aplicados como fertilizante e a diferença ($118\ kgN\ ha^{-1}$) aportada pelo solo. A estimativa de N_{nat} do solo RegAb foi de $128\ kg\ N\ ha^{-1}$, porquanto, considerando a absorção das raízes, foi muito certo o método de estimação. A proporção média de N que aportou o solo representou 81% da AbNT em T1 e 67% em T2, isto é, a adubação forneceu 29% em T1 e 33% em T2. Por outra parte, a diferença de AbNT entre os valores médios de T2 e T1 foi quase igual à diferença entre T1 e T0 (31,5

kg N ha⁻¹), indicando um comportamento linear na resposta do arroz ao N na faixa de absorção avaliada (entre 130 e 170 kg N ha⁻¹).

A componente AbNG não teve idêntico comportamento que AbNT, devido a que houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre as doses T2 e T1 respeito a T0, embora não entre elas. Na restante componente, AbNP_a, T2 foi significativamente maior ($p < 0,05$) que T1 e T0, embora entre estes não houvesse diferenças estatísticas (Tabela 36). As mesmas diferenças que no caso anterior houve na CN na palha, isto é, também T2 foi significativamente maior ($p < 0,05$) que T1 e T0, e também entre estes não houve diferenças estatísticas, no entanto na CN nos grãos foram todos semelhantes. Tampouco houve diferenças estatísticas de CN (grãos e palha) entre os manejos da água (Tabela 36). Quanto a estes, foram muito semelhantes devido a não ter diferenças estatísticas nem na CN nem na absorção, tanto em palha como nos grãos (Tabela 36).

Tabela 36 – Absorção de N em grãos (AbNG), em palha (AbNP_a) e total (AbNT), concentração de N em grãos (CN grãos) e palha (CN palha) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

Componente	Doses de adubação N			Manejos da água			Fonte de variação			
	T0	T1	T2	AS	Ic	In	DA	M	DAxM	CV
AbNG (kgN ha ⁻¹)	74,4 a	92,5 b	93,3 b	85,9	84,5	89,9	***	ns	ns	10,1
AbNP _a (kgN ha ⁻¹)	56,5 a	69,9 a	100,8 b	75,8	69,8	81,6	***	ns	ns	21,9
AbNT (kgN ha ⁻¹)	131,0 a	162,4 b	194,1 c	161,6	154,3	171,5	***	ns	ns	12,7
CN grãos %	0,99	1,02	0,96	1,03	0,95	0,99	ns	ns	ns	6,7
CN palha % (1)	0,66 a	0,64 a	0,83 b	0,71	0,66	0,77	*	ns	ns	10,5

Nota - Valores médios seguidos de letras diferentes nas fileiras, para cada componente, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

DA – Fator Dose de Adubação N, M – Fator Manejos da água, A x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

(1) A variável CN (%) na palha não teve distribuição normal segundo teste de Shapiro-Wilks modificado (InfoStat, 2012), porquanto foi utilizada a transformação $CN(\%) = \sqrt{CN(\%)}$

A análise de ICN e EIN foi contrastante em relação aos resultados de absorção de N, já que o tratamento T2 foi estatisticamente menor ($p < 0,05$) a T0 e T1, resultando estes semelhantes em ambos os indicadores (Tabela 37). O indicador RIN é a inversa da EIN, porquanto também acompanha o comportamento dessa variável, só que ao se padronizar numa tonelada de arroz casca, as variações entre T2 e T1 foram suavizadas, e pelo tanto sem diferenças estatísticas (Tabela 37). Dos

indicadores ICN, RIN e EIN, somente houve diferenças estatísticas neste último, entre o manejo AS (menor) e Ic (maior) (Tabela 37).

A EAbN foi muito alta em todos os tratamentos e sem diferenças estatísticas entre eles (Tabela 37). Em relação a DA, houve uma leve tendência a diminuir em função da maior disponibilidade de N no solo, no entanto foi maior em In e menor em Ic, ainda que com valores também elevados (Tabela 37).

Tabela 37 – Índice de colheita do N (ICN), eficiência interna do N (EIN), relação inversa do N (RIN) e eficiência de absorção de N (EAbN) para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

Componente	Doses de adubação N			Manejos da água			Fonte de variação			
	T0	T1	T2	AS	Ic	In	DA	M	DAxM	CV
ICN (kgN kgN ⁻¹)	0,57 a	0,57 a	0,49 b	0,54	0,55	0,54	***	ns	ns	7,1
EIN (kgBG kgN ⁻¹)	66,2 a	64,2 a	57,7b	59,7 a	66,1 b	62,3 ab	*	*	ns	9,6
RIN (kgN MgPG ⁻¹)	15,2 a	15,8 ab	17,6 b	16,9	15,2	16,5	*	ns	ns	11,6
EAbN	0,93	0,91	0,90	0,91	0,87	0,96	ns	ns	ns	12,6

Nota - Valores médios seguidos de letras diferentes nas fileiras, para cada componente, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

DA – Fator Dose de Adubação N, M – Fator Manejos da água, A x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

A EFisGN é um indicador semelhante à EIN, com a diferença que o primeiro considera BG, no entanto o segundo utiliza PG, porquanto houve as mesmas diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre T2 em relação a T0 e T1 (Figura 66). Também houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre AS e Ic e isso foi devido à produtividade do primeiro foi menor, no entanto a AbNT foi quase igual em ambos (Figura 66). A EFisTN foi semelhante em todos os tratamentos, tanto DA quanto a manejos da água (Figura 66), indicando uma grande proporcionalidade entre a BAT e a AbNT, também refletida na EAbN.

A EUN é o produto da EFisN pela EAbN, porquanto ao não ter este último diferenças estadísticas, as mesmas se correspondem com as primeiras. Assim, em grão, T2 foi menor ($p < 0,05$) respeito a T0 e T1 e também houve diferenças entre AS e In (Figura 66). Em nível de planta, a EUN manteve as diferenças ($p < 0,05$) entre T2 em relação a T0 e T1, no entanto já não foram diferentes entre manejos da água (Figura 66). Isto se deveu a componente BAT no manejo AS foi semelhante aos manejos In e Ic, mas com menores produtividades.

A análise da variância da RAN indicou alta variabilidade (57,3%), com DMS de 40,7%, porquanto nenhum dos tratamentos teve diferenças significativas (Figura 67), sendo a média geral 67%, valor próprio da uréia granulada (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000).

Figura 66 - Eficiência fisiológica total do N (EFisTN), e dos grãos (EFisGN), eficiência de uso do N total (EUNT) e dos grãos (EUNG) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T0: testemunha, apenas com adubação na semeadura; T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios de cada eficiência com letras diferentes maiúsculas nos tratamentos de adubação com N e minúsculas nos manejos da água, indicam diferenças significativas (p < 0,05) segundo teste LSD

Figura 67 - Recuperação aparente do N (RAN) e eficiência agrônômica do N (EAN) para os diferentes manejos da água (AS: aspersão; Ic: inundação contínua e In: inundação intermitente) e adubação com N (T1: 50 kg ha⁻¹ de N e T2: 87 kg ha⁻¹ de N) na safra 2012-13, San Javier, Argentina. Valores médios com letras diferentes indicam diferenças significativas (p < 0,05) segundo teste LSD

Na análise de cada dose de N, não houve diferenças significativas da EAN entre T1 e T2 (Figura 67), indicando uma proporcionalidade do incremento da produtividade por unidade de N aplicado. A mesma linearidade já foi mencionada na absorção do N pela planta. Por outro lado, houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre In e Ic (Figura 67) ainda com muita alta variabilidade (46,9%). Devido à interação não foi significativa, EAN englobou tanto T1 como T2, e a razão da diferença em In deveu-se a T0 que, neste manejo, teve a maior produtividade ($1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ mais que a média de AS e Ic).

4.8.2 Absorção de N - Safra 2011-12

Não houve diferenças entre MOA nem na CN (grãos e palha) nem na absorção de N (Tabela 38). A média de AbNT entre os manejos Ic e In foi de 159 kg N ha^{-1} , e comparando com o tratamento T2 da safra 2012-13, que teve uma dose de adubação equivalente, resultaram 18% inferior. Porém, comparando a AbNG, a média de Ic e In resultaram 8% superior que a média entre T1 e T2. Outra diferença importante entre safras foi a CN, sendo maior nos grãos e menor na palha que a safra 2012-13 (Tabela 38).

Tabela 38 – Absorção de N em grãos (AbNG), em palha (AbNP_a) e total (AbNT), concentração de N em grãos (CN grãos) e palha (CN palha) para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina

Componente	MOA		Manejos da água			MOA			CV
	AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	
AbNG (kgN ha^{-1})	97,4	93,1	84,1 a	99,1 b	102,5 b	ns	*	ns	15,8
AbNP _a (kgN ha^{-1})	55,1	54,6	48,1	59,8	56,8	ns	ns	ns	20,9
AbNT (kgN ha^{-1})	152,6	147,6	132,2 a	158,8 b	159,3 b	ns	*	ns	16,4
CN grãos %	1,21	1,20	1,27 a	1,17 b	1,18 b	ns	*	ns	7,7
CN palha %	0,58	0,53	0,58	0,56	0,53	ns	ns	ns	13,6

Nota - Valores médios seguidos de letras diferentes nas fileiras, para cada componente, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo test LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação (MOA) do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; ns, não significativo

Quanto aos manejos da água, a CN dos grãos em AS foi maior ($p < 0,05$) que os manejos com inundação, e ao contrário, AbNG em AS foi menor ($p < 0,05$), sendo a razão disso a deficiência hídrica, que diminuiu o destino pela maior mortandade de

panículas. No entanto, na palha houve semelhança entre manejos da água, tanto em CN quanto AbNP_a (Tabela 39).

O ICN, RIN e os indicadores de eficiência EIN e EAbN não tiveram diferenças entre MOA (Tabela 39). A disponibilidade de N foi maior à safra 2012-13, devido à quase igual mineralização estimada da MO do solo e algo mais de adubação com N. Porém, a EAbN foi menor que a safra 2012-13, no entanto, EIN e RIN foram semelhantes entre ambas as safras.

Quanto aos manejos da água, só houve diferenças em EAbN, resultando AS significativamente menor ($p < 0,05$) aos manejos com inundação, produto da menor AbNT daquele manejo. Isto também foi refletido na EIN, que foi menor que os outros manejos, ainda que sem significância estatística (Tabela 39).

Tabela 39 – Índice de colheita do N (ICN), eficiência interna do N (EIN), relação inversa do N (RIN) e eficiência de absorção de N (EAbN) para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina

Componente	MOA		Manejos da água			MOA			CV
	AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	
ICN (kgN kgN ⁻¹)	0,64	0,62	0,63	0,62	0,64	ns	ns	ns	6,3
EIN (kgBG kgN ⁻¹)	60,7	59,3	56,5	61,3	62,1	ns	ns	ns	11,1
RIN (kgN MgPG ⁻¹)	16,7	17,2	18,0	16,7	16,2	ns	ns	ns	10,9
EAbN	0,70	0,68	0,61 a	0,73 b	0,73 b	ns	*	ns	16,4

Nota - Valores médios seguidos de letras diferentes nas fileiras, para cada componente, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação (MOA) do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores

* significância F com $p < 0,05$; *** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

As EFisTN e EFisGN foram semelhantes em todos os tratamentos, com média de 122 kgMS kgN⁻¹ e 54 kgMS kgN⁻¹ respectivamente (Figura 68), valores quase iguais às médias da safra 2012-13. No entanto, as EUN (total e grãos) foi estatisticamente diferente ($p < 0,05$) em AS (Figura 68), produto da menor EAbN. Comparando com a safra 2012-13, e considerando só os manejos Ic e In, a EUNT resultou 20% menor.

Figura 68 - Eficiência fisiológica total do N (EFisTN), e dos grãos (EFisGN), eficiência de uso do N total (EUNT) e dos grãos (EUNG) para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina. Valores médios de cada eficiência com letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD. A variável EUNG não teve distribuição normal segundo teste de Shapiro-Wilks modificado (InfoStat, 2012), porquanto foi utilizada a transformação $EUNG = LOG(EUNG)$.

Do mesmo modo que nas anteriores medições, na colheita não houve interação significativa entre DA e manejos da água nem tampouco entre MO e manejos da água.

4.9 Eficiências de irrigação e de uso da água

A EFa na safra 2011-12 foi relativamente alta em todos os manejos da água, com diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre AS (menor) e os manejos com inundação (Tabela 40), fato contrastante no caso de outras culturas, nas quais o manejo AS tem maior eficiência de aplicação (KELLER e BLIESNER, 1990, TARJUELO, 2005). O indicador ETa foi apenas menor que EFa devido a que inclui as precipitações pluviais, e por tanto teve as mesmas diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre AS e os manejos com inundação (Tabela 40). O manejo AS também teve diferença significativa ($p < 0,05$) na EUa, em relação aos manejos com inundação (Tabela 40), devido à menor produtividade e semelhança na estimativa de ETr do ciclo (apesar da deficiência hídrica em AS). Nos indicadores Pa e Paz considera-se a Lib+PP ou Lib em lugar da ETr respectivamente, porquanto as diferenças foram atenuadas e,

ainda com menores valores, o manejo AS já não teve diferença estatística (Tabela 40).

Do mesmo modo que ocorreu com outras variáveis, nenhum dos indicadores teve diferença estatística no MOA (Tabela 40) devido a que também não houve diferenças nem LiL, Lib e BG, e pelo tanto tampouco houve interação significativa com os manejos da água.

Tabela 40 – Eficiência de aplicação da irrigação (EFa), Eficiência total da água (ETa), Eficiência de uso da água (EUa), Produtividade da água (Pa), Produtividade da água azul (Paz), para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina

Indicador	MOA		Manejos da água			MOA			CV
	AP	AT	AS	Ic	In	Pp	M	PPxM	
EFa	0,66	0,65	0,61 a	0,68 b	0,68 b	ns	**	ns	5,4
ETa	0,56	0,55	0,51 a	0,58 b	0,58 b	ns	**	ns	4,6
EUa (kg m ⁻³)	1,44	1,35	1,19 a	1,48 b	1,53 b	ns	**	ns	13,4
Pa (kg m ⁻³)	1,14	1,06	0,98	1,14	1,17	ns	ns	ns	15,8
Paz (kg m ⁻³)	1,35	1,25	1,18	1,35	1,37	ns	ns	ns	16,8

Nota: Valores médios seguidos de letras diferentes nas filas, para cada fator, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

Pp – Parcela principal com momento ótimo de aplicação (MOA) do N, M – Manejo da água, Pp x M – interação fatores

** significância F com $p < 0,01$; ns, não significativo.

Muito diferente foi à safra 2012-13 devido às condições do agro-ecossistema Tç, com altas perdas em PerI_r e PerP devido à maior Kh_s e próximo ao rio San Javier. O manejo Ic foi o menos eficiente (Tabela 41), evidenciando que ante essa condição não é recomendável seu uso na irrigação do arroz. Mais ainda se fosse considerada uma parcela de maior extensão, com perdas (PerI_r) na cabeceira do tabuleiro muito elevadas. Ao contrário do agro-ecossistema Vz, a AS teve a maior EFa (Tabela 41), com possibilidades de se incrementar se fossem mais controladas as perdas por percolação (PerI_r). No entanto, o manejo In teve um desempenho intermédio, devido principalmente a que foi aplicada uma menor Lib que Ic.

Quanto as PP, na safra 2012-13 foram mais importantes que na safra anterior, ainda que o seu aproveitamento fosse baixo em todos os manejos devido às altas perdas por percolação (PerP). O indicador ETa permite avaliar o anterior, devido a que diminuiu ainda mais a eficiência da irrigação em todos os manejos, incidindo com maior proporção no manejo AS (Tabela 41).

Nem EFa nem ETa tiveram diferenças estatísticas com DA devido a que a irrigação foi igual para todos. Ao contrário, quando intervém a BG, ocorrem diferenças significativas ($p < 0,05$) da EUa entre testemunha e as doses T1 e T2 (Tabela 41) devido à menor produtividade de T0 com igualdade de ETr. No caso dos manejos da água, todos foram semelhantes devido a similares BG e ETr.

Quando intervém a Lib+PP (Pa) ou só Lib (Paz), novamente aparecem às diferenças significativas, tanto nas DA como nos manejos da água, por efeito combinado da BG com a eficiência da irrigação. A dose T2 e o manejo AS tiveram o melhor desempenho nestes dois indicadores (Tabela 41).

Tabela 41 – Eficiência de aplicação da irrigação (EFa), Eficiência total da água (ETa), Eficiência de uso da água (EUa), Produtividade da água (Pa), Produtividade da água azul (Paz), para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

Indicador	Doses de adubação N			Manejos da água			Fonte de variação			
	T0	T1	T2	AS	Ic	In	DA	M	DAxM	CV
EFa	0,37	0,37	0,37	0,53 a	0,26 c	0,32 b	ns	***	ns	6,2
ETa	0,24	0,25	0,24	0,32 a	0,19 c	0,23 b	ns	***	ns	4,8
EUa (kg m ⁻³)	1,25 a	1,50 b	1,60 b	1,40	1,47	1,49	***	ns	ns	6,9
Pa (kg m ⁻³)	0,65 a	0,77 b	0,83 c	0,94 a	0,60 c	0,70 b	***	***	ns	7,3
Paz (kg m ⁻³)	0,97 a	1,14 b	1,23 c	1,57 a	0,77 c	1,00 b	***	ns	ns	7,5

Nota: Valores médios seguidos de letras diferentes nas filas, para cada fator, indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) segundo teste LSD.

DA – Fator Dose de Adubação N, M – Fator Manejos da água, A x M – interação fatores

*** significância F com $p < 0,001$; ns, não significativo

4.10 Pegada hídrica

As componentes AUv e AUaz (Tabela 42) foram calculadas a partir dos valores médios da ETr dos tratamentos e da proporção das chuvas aproveitada pela cultura. Por isso resultaram muito dependentes das precipitações pluviais em cada safra (FILIPPI, ENGLER e MARANO, 2013), no entanto os valores de AUcz foram semelhantes devido a similares aplicações de N (para o cálculo na safra 2012-13 foi considerada a adubação feita em T2).

O total da superfície colhida de arroz em Santa Fe na safra 2011-12 foi 47.000 ha, diminuindo a 43.000 ha na safra 2012-13 (ACPA, 2013). O agro-ecossistemas Vz representa o 93% do total colhido, no entanto o agro-ecossistema Tç o 7% restante (ASPA, 2013), resultando com estes dados a Tabela 43

Tabela 42 – Volumes de água verde (AUv), azul (AUaz) e cinza (AUcz) utilizados na produção de arroz em casca e percolação devida à irrigação (PerIr) e às precipitações pluviais (PerP) dos agro-ecossistemas Várzea (Vz) e Terraço (Tç) em San Javier, Argentina

Agro-ecossistema	AUv m ³ ha ⁻¹	AUaz m ³ ha ⁻¹	AUcz m ³ ha ⁻¹	PerIr m ³ ha ⁻¹	PerP m ³ ha ⁻¹
Vz	2.425	3.205	430,5	1.540	1.080
Tç	3.470	2.570	385,3	7.385	1.850

Tabela 43 – Pegada hídrica da produção de arroz em casca em Santa Fe verde (PHSv), azul (PHSaz), cinza (PHScz) e total (PHSc), volumes de água azul (Per_{az}), verde (Per_v) e total (PerT) percolados e volume total disponível (VTD) nos agro-ecossistemas Várzea (Vz) e Terraço (Tç)

Agro-ecossistema	PHSv Mm ³ ano ⁻¹	PHSaz Mm ³ ano ⁻¹	PHScz Mm ³ ano ⁻¹	PHSc Mm ³ ano ⁻¹	Per _{az} Mm ³ ano ⁻¹	Per _v Mm ³ ano ⁻¹	PerT Mm ³ ano ⁻¹	VTD Mm ³ ano ⁻¹
Vz	97,0	128,2	17,2	242,4	61,6	43,2	104,8	347,2
Tç	10,4	7,7	1,2	19,3	22,2	5,6	27,7	47,0
Total	107,4	135,9	18,4	261,7	83,8	48,8	132,5	394,2

Figura 69 – Proporções da pegada hídrica verde (PHv), azul (PHaz) e cinza (PHcz) em relação ao total da produção de arroz em casca em San Javier, Argentina

Para obter a pegadas hídrica da cultura e seus componentes verde, azul e cinza foi utilizada a produtividade média de arroz em casca em San Javier (PG_{Reg}) no período entre 2005-06 até 2012-13, que resultou 5,85 Mg ha⁻¹ (na última safra foi apenas 4,6 Mg ha⁻¹). A PHc do arroz em San Javier teve valores similares em ambos os agro-ecossistemas (Tabela 44), embora fossem variáveis as proporções azul e verde, como já foi mencionado anteriormente. Quando se considera a (PHc) observa-se que os valores foram menores que a média mundial para arroz em casca (1.325 m³ Mg⁻¹, CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011). A Figura 69 representa as proporções de pegada hídrica verde, azul e cinza em relação à pegada hídrica da produção total de arroz em Santa Fe.

Tabela 44– Pegada hídrica verde (PHv), azul (PHaz), cinza (PHcz) e total da cultura (PHc) do arroz em casca e volume percolado por unidade de arroz casca produzido com origem na irrigação (PerVaz), nas precipitações (PerVv) e total (PerVt) nos agro-ecossistemas Várzea (Vz) e Terraço (Tç) em San Javier, Argentina

Agro- ecossistema	PHv m ³ Mg ⁻¹	PHaz m ³ Mg ⁻¹	PHcz m ³ Mg ⁻¹	PHc m ³ Mg ⁻¹	PerVaz m ³ Mg ⁻¹	PerVv m ³ Mg ⁻¹	PerVt m ³ Mg ⁻¹
Vz	412,8	545,5	73,3	1.031,6	262,1	183,8	446,0
Tç	590,6	437,4	65,6	1.093,7	1.257,0	314,9	1.571,9

5 DISCUSSÃO

A discussão será realizada em função dos objetivos específicos desta Tese.

5.1 Caracterização agro ecossistemas

5.1.1 Solo

Segundo as características texturais do PlaNa, e considerando a metodologia do USDA-SCS (Figura 90, ANEXO), as densidades de solo nas camadas 0-0,11; 0,11-0,25; 0,25-0,4 e 0,4-0,6 seriam 1,40; 1,37; 1,40 e 1,35 Mg m⁻³ respectivamente.

No agro-ecossistema Vz, a prática de manejo de arroz contínuo, seguido do pastoreio da palha pelo gado, provocou uma densificação do solo nas camadas superficiais (0-0,25 m). Sua origem dever-se-ia aos seguintes fatores:

i) Geomorfologia. O material de origem do agro-ecossistema Vz corresponde-se com sedimentos transportados pelo sistema fluvial do rio Paraná em combinação com o material fino do loess pampeano que deu origem aos solos da província de Santa Fe (POCOVI, 1947). Os processos geomorfológicos principais que modelaram a geomorfologia atual são as enchentes extraordinárias de braços do Paraná¹ e escoamento superficial de precipitações de grande magnitude sob depressões de orientação nordeste-sudeste. Ambos os fenômenos não são coincidentes, porque as enchentes extraordinárias do Paraná em sua porção média não devem-se às chuvas regionais, o que já ocorre na parte alta da bacia hidrográfica (PAOLI e SCHREIDER, 2000). Esse material foi depositado durante o retiro da água sobre terrenos muito planos.

ii) Textura. Do processo anterior resultou uma textura da camada superficial (0-0,11 m) franco-argilo-arenosa, com 1,4 Mg m⁻³ de densidade sem considerar a estrutura. Neste tipo de solos, com altos teores de areia, as argilas têm um rol fundamental na coesão (OADES, 1993). O mesmo autor refere que são atraídas para os interstícios existentes entre as partículas de areia, pelo menisco da água formado durante a secagem do solo. Partículas de silte também são arrastadas para

¹ Nota do autor: No ano 1999, durante a amostragem de solo num lote distante 10 km do Río San Javier no período de irrigação, foi observada uma fina capa de areia de 2 a 3 mm sobre a cabeceira do lote. Essa areia foi trazida pelo canal, embora eles tenham grande largura e baixa velocidade, propícias para sedimentar a areia no próprio canal. É de supor que da mesma forma haveria sido transportada a areia que deu origem aos solos.

os espaços deixados pelas raízes mortas da floresta existente prévio à incorporação à orizicultura destes solos. Ambos os processos diminuem a fração de poros maiores com origem nos grãos de areia e aumentam a microporosidade. Isto se corrobora com o valor de θ (-10 kPa) na camada superficial do PlaNa, que foi igual à camada superficial do RegAB, ainda com o dobre de teor de areia. Além disso, de acordo com sua classificação textural, nestes solos tem importância à agregação abiótica, o processo de contração-expansão e, fundamentalmente, a componente biológica conformada pelas raízes, os micro-organismos e a fauna do solo (OADES, 1993).

iii) Manejo do solo. Incorporação de lotes sem cultivo à orizicultura contínua com trânsito de maquinaria pesada, especialmente durante a colheita, o solo fica saturado ou muito úmido. Adicionando-se a esta condição o pisoteio do gado que ingressa para pastagem imediatamente após da colheita, provocando danos por compressão do solo ao redor das patas do gado, denominado “poaching” (TABOADA, LAVADO e CAMILIÓN, 1988). Também influi o manejo da palha, com queima após da colheita. Completa este quadro de situação a falta de rotação e lavoura convencional do solo, com várias passagens de grade para preparação da semeadura. Como consequência direta houve perda progressiva de MO, o que significaria possível instabilidade dos agregados e degradação da estrutura do solo (OADES, 1993).

iv) Sódio no complexo de troca. A presença de Na^+ no CTC em solos francos gera dispersão de coloides orgânicos ou minerais, expansão de argilas, aumento da microporosidade e diminuição da estabilidade dos agregados (MARANO, 2000). Em condições prístinas, com alto teor de MO, o efeito dispersante do Na^+ é compensado pela abundância de coloides orgânicos carregados negativamente que mantem floculado ao solo (MARANO, 2008). Quando diminui a fração de húmus da MO ou a solução do solo dilui-se por água com baixo conteúdo de sais (chuvas o irrigação), a ação dispersante do Na^+ aumenta.

v) Manejo da água. A irrigação por inundação contínua mantém uma lâmina de água durante três meses, o que possibilita arranjar as partículas do solo em finas capas eliminando os macroporos.

A densidade de empacotamento (ρ_e) pode ser definida como a máxima densidade que alcança um solo com uma textura determinada, totalmente contraído e amassado, após do reacomodamento das partículas de menor tamanho (argila e

silte) (GUPTA e LARSON, 1979). De modo empírico seu cálculo pode ser obtido com a eq. (64) (PILATTI, GHIBERTO e IMOFF, 2004):

$$\rho_e = \rho_s + 0,009 \text{ Ar} \quad (64)$$

em que Ar é a percentagem de argila

Da eq.(64) resultaram 1,72; 1,66; 1,70 e 1,68 Mg m⁻³ para as camadas 0-0,11; 0,11-0,25; 0,25-0,4 e 0,4-0,6 respectivamente, o que indicaria que o valor de 1,63 Mg m⁻³ na camada 0-0,1m, prévio a semeadura, está próximo a alcançar a máxima densidade de empacotamento.

Por outro lado, no PlaNa houve uma expansão nesta camada durante o ciclo da inundação, ainda com percentagem de argila menores a 35% (OADES, 1993), que permitiu diminuir a densidade e assim melhorar o desenvolvimento das plantas. Este fenômeno foi medido nas parcelas experimentais e também observado nos lotes adjacentes. Durante a expansão, os agregados menores são reintegrados a outros de maior tamanho, aumentando a estabilidade estrutural (TABOADA, LAVADO e CAMILIÓN, 1988). Câmbios volumétricos também foram encontrados por Taboada et al. (2001) em agro-ecossistemas similares da região denominada “Depresión del Río Salado”, Buenos Aires, Argentina. A diferença com San Javier, a origem da inundação são as precipitações pluviais de outono, e os câmbios volumétricos ocorrem durante o inverno. Aqueles autores atribuem os câmbios volumétricos às pressões de ar aprisionado dentro dos poros. O ar aprisionado dever-se-ia, na região del Río Salado, a dois situações (TABOADA et al., 2001): a) ascenso rápido do lençol freático originado nas chuvas de outono e b) camada superficial de solo saturado pelas chuvas sob uma camada argilosa e nátrico quase impermeável. O ar assim aprisionado produz altas pressões que expandem o solo.

No caso de San Javier, a analogia seria a seguinte: em lugar de precipitações que alagam o solo, ocorre inundação com origem na irrigação, para atingir rapidamente toda a parcela, porquanto é provável que também seja aprisionado ar no interior do solo². Por exemplo, o início da irrigação da safra 2011-12 foi feita com

² Nota do autor: Durante a safra 2011-12, caminhando em lotes com arroz adjacentes ao experimento, com alturas de água armazenada entre 0,2 a 0,3 m, grandes quantidades de borbulhas saíam do solo quando era pisado. Reflexionando sobre isso, além de gás metano próprio da decomposição da MO em condições anaeróbias, também seria possível que fosse ar aprisionado no processo de inundação rápida.

umidade do solo em torno de $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e considerando a Pot em $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, haveria $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de espaços vazios com possibilidade de ficar ar aprisionado. Evidencia disto são diferenças entre Pot e θ_s na camada superficial e que o lençol freático não atingiu a superfície com os lotes inundados, aspectos já mencionados em 4.4 e 4.5. As pressões do ar produzem ruptura nos agregados, com perda de estabilidade estrutural (GRANT e DEXTER, 1990), o que acentua ainda mais as possibilidades de adensamento do solo.

Outra possibilidade de expansão deve-se ao teor de Na^+ adsorvido na argila, devido a seu alto raio de hidratação e também à mineralogia das argilas, que se fossem esmectitas seriam expansivas (STEPHAN et al., 1977). Isto dever-se-ia corroborado com análise com difração de raios X.

Em síntese, solos francos com altos teores de areia que segundo a textura seriam classificados como solos com níveis de infiltração e percolação relativamente elevados, podem ser fortemente compactados pela ação antrópica, no entanto os ciclos de inundação-secagem relacionados à componente abiótica (expansão-contracção) que atuam sobre eles têm um rol importante na regeneração de sua estrutura, do mesmo modo que também é fundamental a componente biótica, ainda mais para culturas que requerem condições de aerobiose.

Quanto às propriedades químicas, a principal restrição que apresenta o PlaNa é o teor de Na^+ devido a, além da influência na dispersão e expansão do solo já analisadas, diminui a produtividade da cultura (QUINTERO, 2009). Este autor determinou, em Entre Ríos, uma correlação negativa da produtividade com o aumento no teor de Na^+ no solo. Também se encontrou uma correlação negativa entre Na^+ no solo e K^+ absorvido na palha, sendo este último fundamental para deslocar assimilados aos grãos (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000). A possibilidade de condicionadores químicos para a correção do Na^+ (gesso agrícola), além dos custos, não seria durável devido à camada sub-superficial argilosa de baixa Kh (profundidade de 0,25 m) e a presença do lençol freático tão próximo à superfície. Para que o Na^+ seja efetivamente deslocado dos sítios de intercâmbio catiônico, deve haver adequada percolação do solo e que a profundidade do lençol freático não alcance a zona das raízes por ascensão capilar (MARANO, 2000), ambas as condições ausentes no agro-ecossistema Vz. Outra possibilidade técnica seria a drenagem com tubulação, porém, os custos para tanta superfície são muito elevados. Também não é apropriada a aplicação de gesso pela baixa CTC e

alcalinidade crescente nas camadas sub-superficiais, que torna ineficiente esta prática.

Carnevale et al. (2011) determinaram diminuição do Na^+ trocável por efeito da irrigação continuada com água de rio de boa qualidade, embora isto não ocorresse no lote do experimento, segundo a análise de solo feito pelo produtor no ano 2000. A razão provável seria a camada sub-superficial argilosa, que impede um adequado fluxo para o interior do solo.

No solo RegAb as densidades segundo a textura resultaram 1,40; 1,37; 1,40 e 1,35 Mg m^{-3} para as camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 respectivamente, no entanto os valores de ρ_e -segundo eq.(64)- foram 1,47; 1,45; 1,47 e 1,47 Mg m^{-3} para as respectivas camadas. A ρ_e da camada 0-0,1 m resultou semelhante à determinada após da colheita, porquanto a metodologia de estimação de densidade máxima a partir do teor da argila parece apropriada.

Também foi observada expansão na camada superficial do solo no momento de se realizar o teste com duplos anéis ou em laboratório, só que no campo não houve aumento nos níveis das réguas. No caso do teste com duplos anéis, primeiro é aplicada a água no anel exterior, porquanto o ar pôde se deslocar para os costados, no entanto devido à aplicação rápida da água no anel interior, o ar não teria modo de se deslocar e pelo tanto haveria gerado pressões suficientes para provocar expansão do solo, além de possível composição de argila esmectitas (expansíveis). Na situação de campo, a não expansão pôde haver sido devido ao solo não ficou saturado de modo continuo e pelo tanto o ar pôde se dissolver na água ou sair para a atmosfera.

Ao contrário da expansão e adensamento do solo, o maior problema no RegAb foi à alta K_h e a proximidade do Rio, que aumentaram as perdas por percolação e fluxo lateral.

Quanto aos elementos químicos, nenhum dos analisados seria limitante para o arroz. Os altos valores de P no lote com solo RegAb seriam devido tanto a adubações prévias quanto ao material de origem (loess pampiano), corroborado com análises de laboratório de outros lotes com igual solo (Laboratório INAGRO). Os baixos teores de MO indicam um manejo inadequado do lote, ainda que tenham possibilidade de rotação agrícola. Outra razão seria a condição aeróbica deste solo, com tendência a maior mineralização da MO (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000; NORMAN, WILSON e SLATON , 2003). O Nt também foi baixo, em concordância

com o teor da MO e a semelhança da relação CO/N entre ambos os solos seria devido à composição da palha, principalmente, e das raízes, secundariamente, tendo maior influência a cultura de arroz. Apesar do menor teor de Nt em RegAb, houve similares quantidades fornecidas pelo solo, sendo isto devido à habilidade do arroz de extrair N desde camadas mais profundas, especialmente com maiores condições aeróbicas (MISHRA, 2012).

5.1.2 Variáveis meteorológicas

Considerando que na Argentina em geral e no San Javier em particular o plantio é feito em sequeiro (plantio direto ou convencional), para realizar essa lavoura interessa observar a temperatura e umidade do solo para uma adequada germinação da semente. Além disso, para selecionar a data de semeadura, devem ser consideradas as diferentes etapas fenológicas para o melhor desenvolvimento da cultura. Para as variedades utilizadas na região, de ciclo médio e com início da etapa reprodutiva entre 75 a 90 DAS, a data ótima de semeadura é meados de outubro. Mas nesse mês aconteceram, em ambas as safras, precipitações equivalentes ao dobro da média histórica (Tabela 2), e por esse motivo, no solo PlaNa, não foi possível semear, mudando para o mês seguinte (novembro). Isto trouxe como consequência um atraso nas etapas fenológicas, com período de floração fora do período de maior radiação solar (fevereiro) e com a colheita no mês de março, onde acontecem maiores precipitações. Porém, a RG não foi um fator restritivo na safra 2011-12, pois neste período foi seco e com alta insolação, mas as chuvas durante a colheita dificultaram a entrada das máquinas nos lotes.

Outro problema que sucede quando é atrasada a semeadura e a floração acontece no mês de fevereiro, é a ocorrência de doenças de origem fúngica no final do ciclo, tal como *Pyricularia grisea* (Cooke) Sacc, conhecida no Brasil como brusone, devido ao cultivar Puitá INTA ser sensível. Esta doença não se manifestou na safra 2011-12 porque a PP no mês de fevereiro foi muita baixa em relação à histórica.

Já na safra 2012-13, e devido ao solo RegAb ter melhores condições de drenagem, as chuvas de outubro não impediram semear, sendo assim a colheita aconteceu no mês de fevereiro. A cultura recebeu uma magnitude de RG similar à

safrã anterior e, ainda que sucedessem mais dias com chuvas, nãõ ocorreram doenças. Porém, a maioria dos lotes com solos PlaNa tiveram atraso na semeadura na safrã 2012-13 e o momento da floração ocorreram em fevereiro, mēs com maior frequência de PP o que significou a manifestaçaõ de brusone, afetando a produtividade desses lotes. Por isso, a safrã 2012-13 foi a pior da dēcada, com média regional de tãõ sã 4,6 Mg ha⁻¹ (ACPA, 2013)

Em quanto à umidade de grãõ ótima para colheita (23 a 25%, ACPA, 2013), no caso de semear em outubro e com maturidade fisiológica em fevereiro, quando este mēs fica seco deve-se programar a colheita adequadamente para evitar dessecação rápido do grãõ.

Ao efeito de comparar as variáveis meteorológicas de maior influência no desenvolvimento de arroz ANA, isto é, temperaturas (máximas, mínimas e médias) e radiação global, entre San Javier e outras regiões com alta produtividade a campo (8 a 16,5 Mg ha⁻¹), foi elaborada a Tabela 45.

Tabela 45 – Radiação global (RG) total e média diária do ciclo, temperatura média (Tm), mínima (Tmin) e máxima (Tmax) para diferentes sítios do mundo com produção de arroz ANA

Local	Latitude	Altitude (m)	RG (MJ m ²) total do ciclo	RG (MJ m ² d ⁻¹) média diária	Tm (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Argentina (Santa Fe)	30° S	20	2.635	23,0	23,8	18,9	29,6
Argentina (Entre Ríos) (1)	31° S	150	2.641	20,1	23,8	-	-
China (Yunnan) (2)	26° N	1170	2.380	17,2	24,7	24,0	30,1
Japão (Kyoto) (2)	31° N	20	1.817	13,2	23,8	19,9	28,4
Filipinas (Los Baños) (3)	14° N	21	2.856	20,4	27,3	23,6	30,9
Austrália (NSW) (4)	34° S	140	3.233	23,0	s/d	s/d	s/d
Brasil (RS) (5)	29° S	170	3.300	22,0	24	-	-

Nota – (1) Quintero (2009),

(2) Katsura et al. (2008)

(3) Bouman et al. (2005)

(4) NSW- New South Wales, Humpheys et al. (2006)

(5) Mota (1995), EMBRAPA (2009)

A comparaçaõ com outras regiões permite inferir que San Javier apresenta valores de RG - acumulada e média-, Tm, Tmin e Tmax similares aos locais com maior produtividade de arroz do mundo, indicando, portanto, que esses fatores permitiriam que nesta Região também obtivesse altas produções de arroz irrigado.

5.1.3 Proposta de rotação

A necessidade de propor uma rotação alternativa ao arroz cultivado continuamente deve-se a vários fatores, entre eles: i) reverter a diminuição progressiva da MO, aumentando o volume anual da biomassa de raízes e palha, ii) controle de ervas daninhas, principalmente gramíneas como arroz vermelho (*Oryza sativa* L.) e capim arroz (*Echinochloa* spp). A variedade Puitá INTA foi desenvolvida especialmente para se cultivar em lotes altamente infestados com arroz vermelho, mas desde a safra 2012-13 em San Javier houve indícios de resistência a herbicida, sendo a rotação de culturas uma alternativa eficiente para seu controle (MARCHEZAN et al., 1995); iii) diminuir o risco próprio da monocultura, diversificando a produção.

Não é objetivo de esta Tese indagar em alternativas à produção de arroz, porém, podem ser enunciados alguns possíveis rumos:

i) Alternar com cria de gado, utilizando pastagem natural. Com manejo da água apropriado pode-se regenerar o vegetação herbácea nativa de melhor qualidade e palatável para o gado, segundo algumas experiências regionais, embora ainda não publicadas. A Figura 70 permite observar a cobertura vegetal no mês de dezembro com PP adequadas, no entanto na Figura 71 observa-se o contrário, mortandade de gado quando a seca é extrema. Ambas as condições são frequentes nos ecossistemas santafesinos, porém, a grande vantagem do Vz é que conta com o rio San Javier, além de uma ampla rede de canais que permitiriam aplicar lâminas controladas de água.

ii) No caso de rotação com outras culturas implantadas, a principal dificuldade ocorre no agro-ecossistema Vz devido à drenagem reduzida, especialmente na época de semeadura, não assim em Tç. Uma possível solução seria utilizar BE, do mesmo modo que no sudeste de Austrália para solos impermeáveis com alto teor de argila (BEECHER et al., 2006). Os bordos têm 40 m de comprimento, 1-2 m de largura, 0,1-0,2 m de altura e separados com sulcos de

Figura 70 – Cobertura de herbáceas nativas, em dezembro, em agro-ecossistema Vz com precipitações pluviiais adequadas

Figura 71 – Condição extrema de seca no inverno de 2008 na região norte de Santa Fe, em agro-ecossistema Sub-meridional, semelhante à Vz

a)

b)

Figura 72- (a)Trigo de inverno crescendo sob palha de milho e (b) conformação de bordos elevados segundo sistema de lavoura e máquinas disponíveis

Fonte: Beecher et al. 1997. Reproduzida com autorização do NSW Trade & Investment

0,3 m de largura (OCKERBY e FUKAI, 2001 Figura 72). As culturas implantadas em rotação com arroz, no sudeste de Austrália, foram trigo e cevada, com incremento médio de 26% na produtividade em relação à semeadura sobre solos argilosos com relevo plano (HUMPHREYS et al., 2005). Uma importante vantagem seria conseguir semear após da colheita de arroz com sulcos de 0,3 m de largura (OCKERBY e FUKAI, 2001 Figura 72) para assim aproveitar a umidade armazenada no solo e a cercania do lençol freático na superfície de solo. Neste caso, só dever-se-ia conseguir manter um volume de aeração mínimo tolerável segundo cada cultura.

Por outro lado, na rotação com outras culturas, de inverno ou verão, deverá se analisar os respectivos ciclos, considerando datas de semeadura, colheita e preparo do solo. O mesmo deve ser feito quanto aos preços, custos de produção, comercialização e transporte, tendo em consideração a infraestrutura rodoviária da Região e a distância aos portos exportadores ou também a possibilidade de integrar cadeias (ave de curral, engorde de gado).

Em as alternativas i) e ii) cabe à possibilidade de sistematização do solo com declividade zero, técnica favorecida quando o terreno é muito plano como ambos os agro-ecossistemas avaliados. Apresenta vantagem para a cultura de arroz porque utiliza menor quantidade de água de irrigação (SMITH et al., 2007) devido à regularidade da lâmina de água aplicada. Os custos iniciais são mais elevados que as taipas contornadas segundo a curva de nível, porquanto deveriam conformar-se consórcios ou associações de irrigantes para um melhor aproveitamento da maquinaria. A prática associativa para a compra ou aluguel e uso de máquinas é muito comum nos laticínios do centro de Santa Fe. Esta técnica também é adequada para o manejo In em arroz. Em caso de regenerar a vegetação prístina, a possibilidade de aplicar lâminas controladas é fundamental para conseguir o predomínio de espécies mais palatáveis (PILATTI et al., 2003), no entanto, no caso de rotação com outra cultura com irrigação suplementar (trigo, por exemplo), deverá ter especial cuidado da drenagem em momentos de PP abundantes, para evitar períodos prolongados de anaerobiose, especialmente na emergência das plântulas.

Além da necessidade de substituir a monocultura de arroz com uma rotação agrícola-pecuária, nas condições do PlaNa com solos altamente adensados e presença de Na^+ , também pôde se considerar a utilização de condicionadores orgânicos, entre eles casca de arroz ou esterco de curral. O primeiro é abundante na Região devido à existência de molhinhos que geram como subproduto à casca, no

entanto o esterco de curral deve ser trazido desde regiões vizinhas. Gomes, Gheyi e França e Silva (2000) aplicaram ambos os condicionadores para correção de solos salino-sódicos do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, Sousa, PB, no Vale do Rio Piranhas, aplicando 15 Mg ha⁻¹ de casca de arroz e 40 Mg ha⁻¹ de esterco de curral e lavagem com inundação contínua. Após disso foi feita a implantação do arroz, com manejo lc em todo o ciclo. Os resultados indicaram diminuições da PST na camada de 0-0,2 m, imediatamente após a lavagem, de 71 e 37% com esterco de curral e casca de arroz respectivamente. Os mesmos autores referem que, após do ciclo, a PST foi semelhante na camada superficial com ambos os condicionadores (diminuição média de 58%), indicando que a decomposição anaeróbica da MO em combinação com as próprias raízes, geram condições para melhorar as propriedades químicas do solo. Quanto à produtividade, o esterco de curral superou a casca de arroz, provavelmente pela maior quantidade de macronutrientes aportados pelo primeiro (GOMES, GHEYI e FRANÇA E SILVA, 2000).

Condicionadores orgânicos são utilizados como adubo na Ásia, principalmente com origem em gado, suínos e aves de curral. Dobermann e Fairhurst (2000) referem que para sistemas intensivos de arroz contínuo, o aporte de esterco de curral ou de granja têm importância como fornecedor de N para a absorção das plantas, no entanto em sistemas em rotação, é mais importante o rol da MO como melhorador da estrutura do solo ou incremento da CTC. Sua aplicação é recomendável que seja antes da semeadura, para assim estabilizar a formação de ácidos orgânicos ou elevadas concentrações de nitratos que aumentam a salinidade da camada superficial que podem afetar a emergência das plântulas (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000).

A palha de arroz é a principal fonte de MO dos agricultores, sem necessidade de ser trazida de fora. Em torno de 40% do N, 80 a 85% de K⁺, 30 a 35% do P e 40 a 50% do S absorvidos pelas plantas ficam na palha após da colheita (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000). O manejo da palha está intimamente relacionado à condição do solo durante a colheita. Em caso de estar seco, sem deixar pegada, não é necessário várias passadas de grade de disco para o preparo tradicional da semeadura. Para isto a irrigação é finalizada em R8 e, dependendo da data de semeadura, ocorre a secagem do solo (fevereiro é mais quente que março, pelo tanto mais rápido). Para uma distribuição uniforme da palha que retira a máquina, esta deve ter uma espalhadora na saída, caso contrário fica uma fileira em

cada passada que, meses após, quando seca, geralmente é queimada, devido à na Argentina não existe normativa que impede a queima da palha, total ou parcial. Como alternativa são feitos rolos para consumo de gado, no caso de ter na fazenda essa atividade. Com o resto da palha que fica em pê, aqueles produtores que fazem plantio direto utilizam, após da colheita, o rolo faca já mencionado para aplastar a palha e assim conseguir contato com o solo úmido que permita sua decomposição. Caso contrário, se a planta secou-se em pê, isto não ocorre devido aos altos teores de sílice.

No agro-ecossistema Vz, com ocorrência de PP importantes e colheita em março, o escoamento superficial é lento porquanto a colheita se faz com solo saturado. Nesta condição produz-se o equivalente ao “poaching” do gado, só que com os pneus das máquinas que transitam sobre o lote, porquanto, ainda com plantio direto, prévio a semeadura é utilizada uma plaina niveladora multilâmina para aplanar as irregularidades do terreno e deixar pronto o solo para a semeadura. Outra prática habitual é o pastoreio direto com gado, após da colheita, a razão de 1 cabeça cada 2 a 3 ha.

Cada uma das situações anteriores tem um efeito distinto sobre o balanço dos nutrientes e na fertilidade do solo no mediano prazo. No caso do pastoreio ou confecção de rolos é diretamente uma exportação de nutrientes, semelhante à dos grãos, porquanto no balanço serão diminuídos nutrientes fundamentais como K^+ , Si, S ou micronutrientes como Zn (DOBERMAN e FAIRHURST, 2000). Isto ocorreu no lote do experimento com PlaNa, no qual houve diminuição de K^+ em 10 anos de arroz com pastoreio do gado, segundo os resultados apresentados. Em relação à queima, não é recomendada para o S devido a perdas e, ao contrário, a queima permite a mineralização efetiva do K^+ , perdendo só uma pequena fração (DOBERMAN e FAIRHURST, 2000). Quanto à incorporação da palha ao solo, têm benefícios a mediano prazo devido a contribuir no balanço de nutrientes, aportando N, P e K^+ . Esta prática consome tempo e recursos para a movimentação do solo, porquanto a tendência dos produtores de San Javier é para o plantio direto.

5.2 Balanço hídrico

A metodologia do balanço hídrico para estimativa de algumas das componentes que o compõem é amplamente utilizada em parcelas de arroz

(BOUMAN et al., 1994; LIN et al., 2002; BOUMAN et al., 2005; BOUMAN et al., 2007; DEWANDEL et al., 2008), sendo aplicada para estimativa da ETr na região central de Santa Fe, Argentina, para trigo (CAMUSSI e MARANO, 2008; MARANO et al., 2012) e soja (MARANO, HERMANN e CARNEVALE, 2006). Para a certeza de sua determinação, as demais componentes devem ter a maior precisão possível.

Neste experimento a maior dificuldade foi o cálculo da percolação, tanto Perlr como PerP, própria das dificuldades encontradas em experimentos a campo (BOUMAN et al., 2007). Caixas fechadas enterradas (mini-lisímetros) no solo e cultivadas para avaliar Perlr foram utilizadas por Belder et al. (2004) e Bouman et al. (2005), embora estes últimos autores indicam que, devido à variabilidade espacial do solo, uma combinação de perdas por percolação e drenagem sub-superficial (Perlr+Dss) seria mais representativo, sendo seu cálculo como a diferença entre as entradas e as saídas do balanço. Também Bouman e Tuong (2001) e Bouman et al. (2007) consideram apropriado agrupar Perlr com Dss pela dificuldade de individualizar a campo cada uma separadamente. Para aplicar o mesmo critério nesta Tese, a componente ETr dever-se-ia calculada segundo as equações propostas por Allen et al. (2006), mas preferiu-se estimar Perlr através de q e $K_h(\theta)$ para as diferentes condições de fluxo utilizadas no balanço. Baseado nestas equações, além da continuidade, foi desenvolvido o modelo matemático HYDRUS-1D que permite determinar densidades de fluxo para diferentes condições de solo, cultura, hidrologia e clima (SIMUNEK et al., 2009), sendo uma alternativa para validar os resultados obtidos nesta Tese.

Para favorecer a discussão dos resultados foram consideradas as componentes Lib, PP (entradas) e ETr e Perlr (saídas) do balanço da safra 2011-12, correspondentes às médias dos manejos Ic e In, já que não tiveram diferenças estatísticas, além de ter perdas por Perlr. Destaca-se a Lib do período inicial da irrigação devido à necessidade de armazenar água no perfil do solo para assim poder atingir uma altura h no manejo Ic, além da escassa magnitude de PP nesse estágio. Nos demais, a Lib foi reduzida na medida em que aumentou PP, além de fornecer água para a demanda da cultura (ETR) e as perdas Perlr, que resultaram pequenas em proporção a Lib (Figura 73).

Neste balanço, os valores de ΔL não foram considerados perdas porque representam a lâmina de irrigação necessária para que os diferentes manejos da água possam funcionar num sistema de produção de arroz. Seu valor depende das

PP prévias ao começo da inundação, do solo e do manejo da água, resultando maior para solos adensados e com inundação (ΔL média de 104 mm), menor com AS (ΔL média de 41 mm), no entanto com solo permeável não impacta o manejo da água e reduz-se a só 35 mm. Ao final do ciclo a lâmina armazenada poderia ser aproveitada para outra cultura, como ocorre na Austrália com trigo (HUMPHREYS et al., 2005), no entanto quando se pratica monocultura de arroz, são as ervas daninhas as que consomem a água armazenada. Nos sistemas de produção na Ásia, o preparo do solo para o transplante de mudas (enlodado) com cultivares ANA utiliza uma quantidade de irrigação variável entre 330 mm (PENG et al., 2006) a máximos entre 650 a 900 mm (BOUMAN e TUONG, 2001).

Figura 73 – Componentes de entrada, lâmina de irrigação bruta (Lib) e precipitações pluviais (PP) e de saídas, evapotranspiração real (ETr) e percolação devido à irrigação (Perlr) do balanço hídrico, para os manejos com inundação, na safra 2011-12, San Javier, Argentina

As diferenças de ETr no manejo AS em relação aos de inundação, na safra 2011-12 foram, em média, de 24 mm para os dois estádios. Embora não fossem elevadas, ocorreu no momento mais crítico para a cultura (reprodutivo e de enchimento dos grãos), o que significou deficiência hídrica nas plantas. Uma evidência do mesmo foi o atraso na antese neste manejo, provavelmente devido ao fechamento dos estômatos e redução do metabolismo. Esta é uma estratégia utilizada pelas plantas em geral para prolongar sua vida até encontrar melhores condições de desenvolvimento (CRUSCIOL et al., 2006), além que as variedades ANA de arroz são extremadamente sensíveis a curtos períodos de estresse hídrico

(LU, OOKAWA e HIRASAWA, 2000; BOUMAN e TUONG, 2001; BOUMAN et al., 2007). Além disso, com a metodologia de balanço hídrico utilizada no cálculo da componente ETr, não foi possível separar transpiração (T) da evaporação (Ev). Esta última representa entre 30 a 40% da ETr em condições de boa cobertura (BOUMAN et al., 2005) e, ainda que nos estádios com déficit hídrico as plantas cobriram a superfície do solo, pode haver ocorrido maior Ev e pelo tanto menor quantidade de água transpirada. Fortalece essa ideia o fato que as doses aplicadas com aspersão tiveram pouca penetração, devido à baixa infiltração e alta compactação. Uns poucos centímetros de solo foram umedecidos com cada aplicação o que aumentaria as possibilidades de perda de água por Ev.

Na safra 2012-13, as condições do solo mudaram como também a hidrologia, devido a influencia do Rio sobre o lençol freático. Isto significou um maior gradiente hidráulico para aportar continuamente fluxo subterrâneo para o Rio e, em consequência, a percolação fosse quase 10 vezes maior que no agro-ecossistema Vz. Esta componente foi determinante nas magnitudes da Lib em cada manejo (Figura 74), e por isso não foi possível manter uma lâmina fixa e contínua sobre a superfície do solo.

Ainda que houvesse maior PP, elas não puderam ser totalmente aproveitadas, determinando-se, além de PerI_r, a componente PerP, com a mesma magnitude para todos os manejos. Claramente o manejo AS foi o que teve menores perdas e pelo tanto menor Lib aplicada, resultando a ETr semelhante em todos eles (Figura 74). Se o manejo Ic na safra 2012-13 houvesse sido como na primeira, isto é, mantendo uma lâmina fixa e contínua durante o período de irrigação (83 dias), a Lib seria de até 2.400 mm (média percolação igual a 29 mm d⁻¹).

Figura 74 – Componentes de entrada, lâmina de irrigação bruta (Lib) e precipitações pluviais (PP) e de saídas, evapotranspiração real (ETr), percolação devido à irrigação (Perlr) e a precipitações pluviais (PerP) do balanço hídrico na safra 2012-13, San Javier, Argentina

Na comparativa da ETr de ambas as safras foram considerados os tratamentos In e Ic (2011-12) e T1 e T2 (2012-13) devido a que eles não apresentaram diferenças estatísticas. Considerando o período da irrigação e o ciclo total da cultura, a primeira safra foi menor, em média, 9,2 e 6,8% respectivamente, que a segunda. No entanto para ETo ocorreu o contrário, a primeira safra foi 3% superior à segunda. A principal razão das diferenças em ETr entre safras foi devido às condições ambientais de cada estádio, já que no começo da irrigação até R1, ETr foi 20% maior na primeira, em concorrência com uma maior radiação solar. Para os outros estádios, ao contrário, a ETr da safra 2012-13 foi, em média, 25% maior, também em concordância com uma maior RG nesses estádios. Porém, embora as datas de semeadura houverem sido diferentes, os valores da ETo durante o período da irrigação foram quase iguais. Isto indicaria uma grande semelhança dessa variável nas duas safras.

No solo RegAb, se ao valor das lâminas médias infiltradas com aspersão (12,2 mm) se resta à média da Perlr deste manejo (5,2 mm), resulta a quantidade média de água armazenada, que foi semelhante à estimada na camada entre 0-0,19 m com -10kPa (9 mm). Do mesmo modo, considerando os valores médios da Lib aplicados nos manejos In e Ic (44,1 e 31,4 mm respectivamente) e suas respectivas médias de Perlr, as diferenças foram 14,1 e 8,1 mm respectivamente. No caso de In

e considerando que antes de cada irrigação o solo esteve com potenciais de -10 kPa segundo os tensiômetros, a água armazenada atingiu uma profundidade intermédia entre 0,2 a 0,4 m (Tabela 24), o que significaria que as raízes poderiam alcançaram maior profundidade de exploração para absorver água. Quanto a Ic, o solo não conseguiu se manter saturado durante 24 h, e a média do armazenamento correspondeu-se com a ETr diária. A semelhança de água armazenada entre Ic e AS poderia se dever a ambos tiveram frequências de irrigação diárias. Por outro lado, os maiores valores da média da Perlr das aplicações (Ic e In), não superaram a densidade de fluxo (percolação) estimada para o solo RegAb, que foi em torno de 30 mm d⁻¹, confirmando este valor como adequado.

Valores de taxas de percolação muito similares ao do solo PlaNa (2,8 mm d⁻¹) foram determinados por diversos autores para outras regiões. Vries et al. (2010) referem médias entre 2 a 2,8 mm d⁻¹ para solos argilosos (40 a 65%), compostos de smectitas e caulinitas, no oeste de África; Hafeez et al. (2007) médias de 2 mm d⁻¹ para Vertissolos e Planossolos de textura franco-argilo-siltosa na Filipina; Belder et al. (2004) média de 1 mm d⁻¹, também na Filipina, e de 4,5 mm d⁻¹ em Tuanlin, China, em ambos os casos com solos franco-argilosos. No entanto, Bouman et al. (2005) na Filipina, diferenciaram a percolação segundo o regime da PP, isto é, média de 0,7 mm d⁻¹ na estação úmida e 1,7 mm d⁻¹ na seca, embora tivessem alta variabilidade. Os valores anteriores, além da textura franco argilosa do solo, têm em comum a presença do lençol freático próximo à superfície. Por outro lado, Lu, Ookawa e Hirasawa (2000) determinaram maior quantidade de irrigação no manejo Ic em relação à In, e também quando a lâmina aplicada passou de 0,03 a 0,07 m, atribuindo isto a maior percolação devido à lâmina h continua do manejo Ic, ou à maior altura da lâmina, ainda com solos altamente adensados. No solo PlaNa isto não ocorreu, sendo as doses de Lib quase iguais (Tabela 17).

Embora seja considerada desprezível a componente Dss (drenagem sub-superficial) pela compactação das taipas e alagamento dos carregadores, é provável que a componente Perlr tenha incluído também alguma proporção desta componente. Valores combinados de Perlr + Dss são comum na bibliografia. Bouman e Tuong (2001) referem perdas combinadas de Perlr+Dss para solos franco-arenosos entre 20 até 90 mm d⁻¹, no entanto em solo franco-argilosos diminuem para 13 a 16 mm d⁻¹. Também Bouman et al. (2007) referem Perlr+Dss entre 25 a 30 mm d⁻¹ para solos arenosos e franco-arenoso e lençol freático

profundo, semelhantes em magnitude ao solo RegAb, ainda que com textura diferente.

Considerando os valores de $PerI_r$ resultantes em ambos os solos, as perguntas a seguir são: a água que percolou, alcançou o lençol freático? Ele aumentou?

Para o solo PlaNa, supondo que o solo estivesse com conteúdos em torno de capacidade de campo e com uma porosidade drenável média de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (segundo CRH), o ascenso do lençol seria de 3 m, situação que não foi evidenciada no poço de observação do lençol freático próximo às parcelas, com incrementos de só 0,5 m durante a irrigação. É provável que uma parte da $PerI_r$ permitisse acrescentar os conteúdos de água das camadas inferiores do solo, mas também que outra proporção do fluxo que alcançou o lençol freático tivesse movimentação para as vias de drenagem regionais (rios San Javier ao este e Saladillo ao oeste). Também é factível que alguma proporção da percolação drena para os canais de drenagem como fluxo sub-superficial (D_{ss}), resultando válido o suposto de combinar $PerI_r + D_{ss}$ (BOUMAN et al., 2005; BOUMAN e TUONG, 2001 e BOUMAN et al., 2007).

Também no caso do lote com solo RegAb, toda a água percolada alcançou o lençol freático, acrescentando seu nível em 1,9 m desde o início da irrigação. Considerando a maior $PerI_r$ (manejo Ic) e um valor de $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade drenável nesse solo, o lençol freático deveria incrementar-se em 14 m, que obviamente não sucedeu. Por isso, em torno de 116 mm de percolação (parte $PerI_r$ e parte $PerP$) permitiram o ascenso, mas o resto retornou ao rio San Javier, distante só 380 m do experimento. Se o lote estivesse a maior distância do rio San Javier, ainda com o mesmo solo RegAb, o gradiente hidráulico entre o lençol freático e o rio diminuiria, aumentando seu nível e ficando mais perto da superfície do terreno, porquanto as perdas por percolação seriam menores. A consequência dos resultados anteriores objetiva-se como de importante que futuras pesquisas permitam determinar o fluxo subterrâneo com origem na irrigação.

Como síntese, surge importante que a diminuição das perdas por percolação pode ser obtida se uma capa airada fica na camada sub-superficial argilosa, imediatamente abaixo da camada superficial saturada, para que a K_h dependa de θ e assim diminuía num ordem de magnitude, reduzindo a densidade de fluxo. No solo

PlaNa isto ocorre com a inundação rápida do lote, no entanto no RegAb devem ser utilizados manejos de irrigação que não saturem o solo (AS ou In).

A comparativa da ETr obtida nesse trabalho com outras regiões pode ser realizada somente com aquelas nas quais coincidem, ao menos, o material genético, as condições ambientais e o manejo da irrigação. Por isso, as regiões mais comparáveis são o Litoral fluvial de Argentina, Uruguai e Sul do Brasil. Porém, foi considerado mais apropriado comparar os coeficientes únicos de cultivo do arroz, pela razão que eles sintetizam a relação ETr – ETo e permitem abranger ao resto das regiões produtoras.

A utilização do Kc para o manejo da irrigação é útil com a aspersão, devido a que conhecendo seus valores em cada estágio fenológico, em conjunto com os dados da ETo, podem ser determinadas as doses da irrigação. Já nos manejos com inundação, tanto contínua quanto intermitente, sua importância é menor, embora possa ser útil para o planejamento geral de uma região ou fazenda mesma. A razão disso deve-se a dose da irrigação nesses manejos depende da aplicação de uma altura fixa de água (Ic) ou variável (In). Os resultados de Kc da safra 2012-13 ajustam-se de modo semelhante aos valores referidos por Allen et al. (2006), isto é, médias de 1,05 ao início da irrigação e 1,2 desde R1 até R8, no entanto na safra 2011-12 foram levemente inferiores, entre 5-10% segundo estádios (Figura 75).

Figura 75 – Evolução do coeficiente de cultivo (Kc) em relação aos dias à semeadura (DAS) para a média dos tratamentos nas safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina

Na Espana, região de Aragon (41° 43' N, 0° 49' O e 225 m de altitude), com clima semiárido, Martínez Cob e Pérez Cobeta (2006) determinaram os valores de

Kc para diferentes estádios de cultivares de arroz de ciclo largo e irrigados com aspersão. Os autores indicaram que, após da emergência já foi necessário irrigar, e como as plantas não cobriram o solo, geraram-se maiores perdas por Ev da água. Assim, apenas 20 DAS, os valores de Kc foram entre 0,8 a 1,1, muito maiores aos obtidos nessa Tese, pelas razões antes explicadas. Já em R4, os autores reportam valores de 1,2, quase iguais aos obtidos na safra 2012-13.

Outra pesquisa para manejo da irrigação com aspersão em arroz com base no Kc foi feita no Brasil, região de MS (20° 22'S, 51° 22' O e 335 m de altitude) nas safras 1994-95 e 1995-96 (CRUSCIOL et al., 2003). A variedade utilizada foi própria de terras altas (AE) com ciclo intermédio (95 DAE) e a irrigação foi suplementar às precipitações. Os autores concluem que desde emergência até 30 dias antes da antese, o Kc variou entre 0,2 a 0,4 e, no período de maior consumo da água, incrementam-se até 1,3 a 1,95, alcançando maior produtividade com máximo Kc. A principal diferença daquela região com as condições de San Javier consiste na característica da irrigação, isto é, ela é apenas suplementar as precipitações. Assim, de um total em torno de 770 mm de água disponível, somente 85 mm correspondeu a irrigação. Essa situação é muito diferente à de San Javier, onde a proporção da chuva na ETr foi muito menor e, pelo tanto, a utilização de Kc tão elevados não seria aplicável.

Segundo os resultados obtidos nessa pesquisa, e corroborados com a literatura, pode concluir-se que para variedades de arroz ANA, irrigados tanto com inundação quanto aspersão, resulta valores de Kc de 1,05 ao começo do período da irrigação, que aumentam até 1,2 no período reprodutivo e que mantem-se até finalizar a irrigação. No entanto, ao início e ao final do ciclo, os valores 0,4 e 1,0 respectivamente, são adequados para condições de sequeiro.

O escoamento superficial, Ds, foi desprezível, tanto na safra 2011-12 devido a poucas precipitações no período de irrigação, como na seguinte, porque apesar das maiores chuvas nenhum evento superou o nível dos vertedouros (0,10 m) acima do qual haveria excedente de água. Em condições de campo e lotes sistematizados com taipas que aplicam uma lâmina de irrigação continua entre 0,08 e 0,10 m, quando acontecem chuvas importantes (ao menos de 40 mm), começa um processo de deslocamento de excedentes hídricos. O mesmo inicia-se nos tabuleiros superiores, próximos ao canal de irrigação e continua para abaixo, na direção da drenagem. A massa de água incrementa-se no interior dos tabuleiros e, por

gradiente hidráulico, move-se para o seguinte, devido à interconexão que têm entre eles. A massa de água que chega a drenagem é maior quanto maior é a superfície do lote. Se o mesmo fosse sistematizado com declividade zero ou quase nula, e com controle do volume aplicado, as massas de água não conseguiriam gerar gradiente hidráulico suficiente como para se deslocar e pelo tanto poderiam ficar retidas no próprio tabuleiro.

Além disso, não houve Ds quando foram aplicadas as irrigações devido a um adequado controle das lâminas. Porém, isto não ocorre nas condições de campo devido a diversos problemas operacionais como a falta de sistematização do solo, inexistência de automatização de estruturas hidráulicas e manejo manual da irrigação (MARANO et al., 2013).

5.3 Manejos da água

Os manejos da água tiveram diferentes impactos sob a cultura a partir de duas situações, uma permitindo maior ou menor disponibilidade de água para sua absorção pelas plantas, e outra incidindo com a saturação/não saturação do solo sob a mineralização/imobilização das diferentes formas de N.

5.3.1 Aspersão

Apesar que nos experimentos foram utilizados sistemas de aspersão estacionários ou convencional, no campo o sistema de aspersão mais apropriado para utilizar seria pivô central, particularmente baixo rotação agrícola com outras culturas ou pastagem. No sul do Brasil é empregado de modo incipiente o pivô em arroz com variedades ANA (Figura 76) em rotação com trigo, soja e milho. Na região dos cerrados, GO, Brasil, foram feitas pesquisas com aspersão e variedades AE há pelo menos 40 anos (STONE et al., 1986; STONE e SILVEIRA, 2004; PINHEIRO et al., 2006).

Figura 76 - Pivô central em São Borja, RS, Brasil

Nota - O autor visitou uma fazenda em São Borja, RS, Brasil, tendo a oportunidade de fotografar uma variedade de arroz ANA irrigada com pivô central, no mês de fevereiro de 2011.

As principais vantagens da utilização do pivô em arroz seriam:

- a) mecanização total da irrigação, com automatização,
- b) aumento nas eficiências de aplicação e total da irrigação, além de maior produtividade da água e da água azul. Estas condições ocorrem somente quando o solo utilizado para a cultura tem alta $Perlr$ devido às condições de infiltração, $Kh(\theta)$, lençol freático profundo ou, ainda próximo à superfície, vinculado a vias de descarrega regionais e com alto gradiente hidráulico,
- c) colheita com solo seco, evitando pegada das máquinas,
- d) menores labores do solo, particularmente se houve pegadas profundas por trânsito das máquinas na colheita,
- e) não requer da sistematização do solo para aplicar as irrigações,
- f) aplicações ligeiras durante a semeadura para favorecer maior uniformidade de plântulas na emergência,
- g) fertirrigação

A principal desvantagem seriam os custos de inversão e operação, ambos os muito elevados, considerando que o requerimento médio da Lib foi de 550 mm por

ciclo em San Javier. Para outras regiões de Argentina, Uruguai e Sul do Brasil não seriam muito diferentes se fossem utilizadas variedades de arroz semelhantes.

Para extrapolar os resultados a essas regiões, o solos deveriam ser semelhantes à RegAb para permitir adequada infiltração das lâminas aplicadas. Porém, este manejo não seria recomendável com solos semelhantes à PlaNa, nos quais a planta de arroz seria sometida a deficiência hídrica, ainda com irrigações diárias.

As perdas totais de água no manejo AS foram 226 e 251 mm nas safras 2011-12 e 2012-13 respectivamente, ainda que na primeira safra não houvesse perdas devidas a Perlr e na segunda representaram 79%. Isto significa que as perdas por deriva e evaporação foram muito diferentes em ambas as safras. Na safra 2011-12 a EAp foi menor, devido à altura e localização dos emissores, que foram susceptíveis à ação dos ventos já que nesta safra, no período da irrigação, apresentaram-se 27 dias com velocidades maiores a 2 m s^{-1} . Outra razão foi a baixa lâmina aplicada, devido a eficiência aumenta com o incremento da dose (KELLER e BLIESNER, 1990, FAO, 2001). Valores de EAp semelhantes (0,72) foram obtidas com pivô central para lâminas médias aplicadas de 25 mm (NASCIMENTO et al., 2013). Na safra seguinte a EAp aumentou, devido à no período da irrigação apresentaram-se menos dias com velocidades maiores a 2 m s^{-1} (19 dias). Também influenciou a menor altura do porta-aspersor e as características do aspersor selecionado, que permitiu ajustar a direção do jato segundo os ventos, evitando assim que as gotas sejam arrastadas fora das parcelas. Valores semelhantes de EAp foram obtidos por Cainelli et al. (1997) num pivô central no RS, Brasil, com velocidades médias do vento menores a 3 m s^{-1} .

Na literatura, a EAp também é denominada Eficiência de Descarrega (Ed) ou *Discharge Efficiency* (TARJUELO et al., 1999). Em avaliações sob sistemas de aspersão estacionários (fixos), estes autores determinaram Ed mínimas, médias e máximas de 0,76, 0,86 e 0,96 respectivamente, em concordância com rangos de velocidades de vento de 4 a 4,6, 2 a 4 e 0 a 2 m s^{-1} , respectivamente.

O indicador de eficiência EAp, utilizado para a obtenção da LiL, pode ser substituídos por outros. Keller e Bliesner (1990) propõem como indicador a Eficiência de Distribuição (DEpa), definida como a relação entre a lâmina mínima recebida na área adequadamente irrigada e a lâmina média total recebida em toda a área. DEpa é um parâmetro de desenho onde intervêm CUC e o Porcentagem da área irrigada

adequadamente (pa). O parâmetro pa corresponde-se com a parte da área que recebe uma lâmina maior ou igual à irrigação real necessária, variam entre 80 a 90%, em função do custo do sistema e do valor comercial da cultura. Este indicador é utilizado em avaliações de pivô central (CAINELLI et al., 1997, PINTO, DA SILVA e OLIVEIRA, 2006), mas não foi considerado apropriado de utilizar neste experimento pela pequena dimensão das parcelas. Porém, no caso de utilizar pivô central, tanto EAp quanto DEpa seriam apropriados para determinar a eficiência de aplicação.

Para diminuir as perdas por deriva e evaporação, uma possibilidade seria acrescentar a Lib. Para isto deve-se diminuir a taxa de aplicação, porque maiores doses numa única aplicação implicaria superar o Tp que fosse determinado para o solo RegAb e favorecer o escoamento superficial. No caso do sistema de aspersão convencional dever-se-ia selecionar outros aspersores com gotas menores, o que poderia trazer como consequência maior deriva, efeito contrário ao buscado. No caso do pivô, as taxas de aplicação são variáveis, aumentando desde o centro até o extremo. O desenho agrônômico do pivô leva em conta uma sequência de cálculos. Marano (2013) recopilou diferentes procedimentos mencionados na bibliografia, utilizando a equação de Kostikov para estimar o tempo máximo de aplicação, necessário para evitar escoamento superficial na última torre. Este tempo poderia ser substituído por Tp, obtido com o modelo GAML devido a ter melhor ajuste que Kostikov. A distância entre os aspersores do pivô e o dossel deve ser a mínima para diminuir os efeitos do vento, porquanto uma altura de 1 m acima da superfície do solo seria desejável.

Tensões de água no solo em torno a 25 kPa e profundidade de controle de 0,2 m não foram satisfatórias no solo PlaNa, no entanto -10 kPa e profundidade de 0,10 m no solo RegAb permitiram adequada absorção de água, embora houvesse Perlr que poderia ser diminuída. A grande diferença foi devido ao tipo de solo, já que no PlaNa as propriedades físicas limitaram a infiltração e movimentação das lâminas aplicadas. Stone et al. (1986) e Stone e Silveira (2004), propuseram uma profundidade de controle de 0,15 m e tensão de 25 kPa para solos do Cerrados com alta percolação, embora admitindo mermas da produtividade em torno a 10-15%. O uso de tensiômetros de cápsula porosa nas camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m no solo RegAb permitiram um adequado controle da irrigação e também definir o momento de reinício após de PP. Quanto aos tensímetros, transdutores de pressão e

dispositivo eletrônico para armazenar dados, seria possível automatizar a irrigação em áreas experimentais, aspecto que também foi avaliado por Camargo (2012).

Dois problemas específicos do manejo As e relacionados com a cultura são a possibilidade de doenças e arraste dos grãos de pólen. Para evitar isto último, as irrigações -em geral para todo o ciclo, e durante a floração com maior cuidado-, começaram à 06:30, duravam média hora por bloco e culminavam entre 1,30 h e 2 h após, tratando de evitar o contato das gotas dos aspersores com os grãos de pólen. Para muitas variedades de arroz e dependendo das temperaturas, a antese ocorre entre as 08:00 e 13:00 (YOSHIDA, 1981). Porém, em alguns dias pôde haver superposição entre as aplicações e a antese, provocando possível arraste dos grãos de pólen. Isto seria uma possível razão da maior esterilidade das espiguetas no manejo AS. Na safra 2012-13 foi apenas 3% maior que os manejos com inundação e, na safra 2011-12, o impacto da deficiência hídrica na esterilidade das espiguetas haveria sido muito maior que o possível lavado dos grãos de pólen. Numa pesquisa com arroz irrigado com aspersão aplicou-se as doses de irrigação durante a tarde para evitar que as gotas dos aspersores tivessem impacto sob a flores abertas (Mc CAULEY, 1990). Porém, em condições reais a irrigação deve ser feita o dia inteiro para otimizar a equipe, sem possibilidades de suspender quatro ou cinco horas ao dia.

O arroz não foi afetado por doenças nenhuma nas safras avaliadas, ainda na bibliografia há resultados contrastantes quanto à ocorrência de doenças originadas pela aspersão. Westcott e Vines (1986) referem diminuição na produtividade de arroz irrigado por aspersão devido à queima-da-bainha (*Rhizoctonia solani*), com possível origem num aumento na umidade do dossel e molhado das folhas ou também por salpicadura das gotas com inóculos que se encontram nos restos vegetais. Porém, Marano et al. (2012), demonstraram que a aspersão com pivô central não incrementa nem a incidência nem a severidade de doenças, também fúngicas, na cultura de trigo. McCauley (1990) também relata que na irrigação por aspersão as doenças em arroz ANA podem ser totalmente controladas.

Além dos problemas específicos devidos à aspersão, a principal dificuldade que teve este manejo, na safra 2011-12, foi à deficiência hídrica, que se manifestou em diferentes estádios fenológicos e órgãos do arroz. Esta deficiência deveu-se à dificuldade da água aplicada de se infiltrar e atingir apenas uma camada de 0,13 m no solo PlaNá, sendo que a maior densidade de raízes apresentam-se até 0,25-0,3

m (BOONJUNG e FUKAI, 1996). Pesquisas sob irrigação por aspersão na Argentina são poucas e a informação disponível é escassa. Westcott e Vines (1986) referem mermas na produtividade de arroz ANA -devido a menor NEt- com origem na deficiência hídrica no momento da diferenciação da panícula. Embora os autores indiquem que a umidade de solo foi adequada, considerando que a irrigação foi feita cada dois-três dias e o solo foi argiloso (vertissolo), provavelmente o Ψ_m haja sido mais baixo que -10 kPa e haveria sido a razão do estresse hídrico. Mc Cauley (1990) também reporta diminuição da produtividade de arroz irrigado com aspersão (média de 20% em relação a Ic) devido a deficiência hídrica entre 32 e 5 dias prévios à floração, o que significou menor número de espiguetas por panícula. No Brasil as maiores quantidades de pesquisas com aspersão foram feitas em arroz AE, que apresenta valores de FE mais baixos em condições de sequeiro, entre 60 a 70% (CRUSCIOL et al., 2003, ARTIGIANI et al., 2012) e aumentam significativamente com aspersão, ainda que não supere 80% (CRUSCIOL et al., 2006). No mesmo sentido, Toescher et al. (1997) também determinaram perdas de produtividade (34%) em cultivares de arroz ANA no Sul do Brasil, utilizando como controle da irrigação potenciais de água no solo de -33 kPa. Isto indicaria que o problema do estresse hídrico deveu-se ao potencial do manejo da água antes que ao método de irrigação. Ao contrário, na safra 2012-13 este manejo permitiu considerável economia de água, alcançando altas produtividades, devido às melhores condições de infiltração e $K_h(\theta)$.

O manejo AS também teve impactos sob a adubação, e, por conseguinte, com o fornecimento de N. Porém, isto é próprio da condição não saturada do solo, que não ocorre na condição particular da aspersão, e que ocorreu também no manejo In (safra 2012-13). No tópico interação- manejos da água-adubação com N- mineralização da MO são discutidos os principais efeitos da alternância saturação/não saturação sob a mineralização/imobilização e as diferentes formas de N, decorrente do manejo AS, embora também aplicável a In.

5.3.2 Inundação intermitente

A hipótese que sustentou a utilização deste manejo foi o aproveitamento das precipitações, no entanto a sistematização do solo -declividade zero o curvas de

nível- e o resto das práticas culturais não mudam em relação ao manejo Ic. A atenção do pessoal responsável da irrigação deve ser maior neste manejo devido à, quando sumiu a lâmina h, se não é imediatamente repostada sobrevém rapidamente deficiência hídrica (BOUMAN e TUONG, 2001).

Na safra 2011-12 manteve-se o solo saturado durante todo o ciclo com este manejo, não ocorrendo deficiência hídrica em nenhum dos estádios e com resultados da produtividade e suas componentes quase iguais a Ic. Apenas houve diferenças estatísticas com Ic no estádio R2, atribuídas à disponibilidade de N no estádio de perfilhamento, aspecto a discutir no tópico interação manejos da água-adubação com N-mineralização da MO. Nesta safra não houve economia de água devido as PP foram baixas, porquanto EFa, ETa, EUA, Pa e Paz foram muito semelhantes, não permitindo expressar a principal vantagem deste manejo, isto é, o aproveitamento das precipitações.

Ao contrário, na safra 2012-13 o manejo In foi diferente a Ic devido às condições hidrológicas e de solo do agro-ecossistema Tç. O solo ficou não saturado, de modo semelhante ao manejo AS e, embora tiver irrigações em dias alternados, o Ψ_m na camada 0-10 esteve sempre em torno a -10 kPa. Esta condição assemelha-se ao manejo leS praticado tanto na Ásia (BELDER et al., 2004; BOUMAN et al., 2005; BOUMAN, LAMPAYAN e TUONG, 2007) quanto no Sul do Brasil, já que Toeschler et al. (1997) também realizaram pesquisas com manejo intermitente com Ψ_m em torno a -10 kPa. As possíveis perdas de N seriam semelhantes ao manejo AS ainda que, devido a não ter interação significativa entre DA e manejos da água, as perdas e ganhanças de N haveriam sido semelhante em todos os manejos.

O mais importante do manejo In no agro-ecossistema Tç foram os indicadores relacionados à irrigação, EFa, ETa e Paz, que quase duplicaram a Ic, representando uma economia de 21% na Lib. A variável PP, ainda que maior à safra anterior tivesse altas perdas devido à maior percolação do solo RegAb, porquanto também não pôde ser muito aproveitada. Quanto à produtividade, foi quase igual à Ic, corroborando os resultados da safra anterior.

Três argumentações importantes surgem dos resultados com o manejo In:

a) Permitiu uma economia da água aplicada devido ao controle das perdas por Perlr, fato não comum na bibliografia. As pesquisas habitualmente referem economia de água devido ao aproveitamento das PP. Mezzomo (2009)

reporta uma economia da lâmina aplicada (32%, $2.620 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) devido a menor água escoada (40%) no manejo In em relação à Ic e no Sul do Brasil, no entanto, na mesma região do Brasil, Toeschler et al. (1997) determinaram uma economia média de 22% ($2.411 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) na água aplicada no manejo In em relação à Ic, devido também a um maior aproveitamento das PP, 92,5% no manejo In contra 63,5% no manejo Ic. Na Argentina, Filippi, Marano e Arguissain (2013) determinaram 26% ($2.332 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) de economia de água no manejo In em relação à Ic para variedades ANA cultivadas em Entre Ríos. Belder et al. (2004) referem economia de água entre 15-18%, algo menos aos valores antes mencionado e Bouman e Tuong (2001) reportam valores de 23% com manejo In. Os resultados de Lu, Ookawa e Hirasawa (2000) também referem economia de água do manejo In, ainda que somente quando o solo mantém-se saturado. Neste caso, aplicou-se 32% menor que no manejo Ic, fundamentado nas maiores perdas por percolação devida à altura h deste manejo. Ainda que os autores não refiram perdas devida a fluxo lateral (D_{ss}), esta componente deve ser muito controlada em parcelas experimentais (BOUMAN et al., 1994; BOUMAN et al., 2005 e BOUMAN et al., 2006). Quando o manejo In resultou com potenciais (-10 ou -20 kPa), já não houve economia de água e, ao contrário, apresentaram um consumo de água 70% a mais. A razão disso foi à formação de fendas no solo pelo alto teor de argila, de modo que, ao momento da irrigação, a água tem movimentação preferencial (LU, OOKAWA e HIRASAWA et al., 2000). Nem no solo PlaNá nem RegAb houve fendas nos manejos de água não saturados, provavelmente devido aos teores de argila na camada superficial não superam 30%.

b) Nenhuma das safras houve diminuição da produtividade. Nas pesquisas de Mezzomo (2009) e Toeschler et al. (1997) tampouco encontraram diferenças na produtividade em relação à Ic, este último também com condições de solo aeróbico no manejo In (tensão de -10 kPa). Do mesmo modo, Belder et al. (2004) com manejo leS e Ψ_m em torno a -10kPa, não reportaram diferenças de produtividade. Os resultados anteriores contrastam com os obtidos por Bouman e Tuong (2001) que reportam diminuições entre 10-40% na produtividade de arroz ANA cultivado em solos argilosos na Índia e nas Filipinas quando o Ψ_m oscila entre -10 e -30 kPa. Porém, quando o solo mantém-se saturado, semelhante à In da safra 2011-12, a diminuição foi apenas de 6%. As conclusões de estes últimos autores são aplicáveis a esta Tese devido ao manejo AS da safra 2011-12 pôde assemelhar-se à primeira situação (perda da produtividade entre 10-40%), já que se desenvolver

também com Ψ_m entre -10 e -30 kPa e com solo adensado, no entanto o manejo In, sem merma da produtividade, é a prática que Bouman e Tuong (2001) recomendam para conseguir economia de água. Lu, Ookawa e Hirasawa (2000) também determinaram que o manejo In com potencial zero (solo saturado) é a melhor combinação para conseguir economia de água e manter a produtividade do arroz.

c) A variedade de arroz utilizada desenvolveu-se tanto em condições anaeróbicas (solo PlaNa) quanto aeróbicas (solo RegAb). Na condição aeróbica do solo, aplicar lâminas diárias de menor magnitude (AS) ou maiores em dias alternados (In) teve resultados de produtividade semelhantes, mais que com diferenças muito importantes nos indicadores de eficiência da irrigação.

Para atenuar as perdas por Per_{lr} no manejo In (solo RegAb), poderia se diminuir a lâmina aplicada com cada irrigação, de 40 para 30 mm. Isto implicaria que a profundidade de solo que atingiria seria menor, e semelhante aos manejos AS ou Ic. Como critério de controle, τ não deve ultrapassar 10 kPa.

Para garantir a aplicabilidade do manejo In a campo, pôde se utilizar um *layout* que permita aplicar uma lâmina h cada certo intervalo de dias, de modo semelhante à inundação de tabuleiros. Esse intervalo de dias dependerá da percolação e da evapotranspiração, de modo que a superfície do lote a irrigar pôde ser parcelada nessa quantidade de dias e o volume de água a aplicar deveria garantir armazenar a lâmina h desejada. Um esquema deste tipo (Figura 77) foi projetado para um lote de 95 ha, característico da área orizícola de Entre Ríos, na Argentina (FILIPPI, MARANO e ARGUISAIM, 2013). Também favorece a aplicabilidade do manejo In a sistematização com declividade zero, prática com viabilidade de implementação em San Javier, Argentina.

No caso que a cultura necessitar uma lâmina h durante o estágio de microsporogênese, muito sensível a baixas temperaturas (PEREIRA da CRUZ et al., 2006), para manter o esquema da Figura 77, o sistema deve prover suficiente volume de água durante os dias que se requereria essa lâmina.

Figura 77 - Esquema de manejo semanal com irrigação intermitente num campo com produção de arroz

5.4 Desenvolvimento da cultura

5.4.1 Fenologia

A escala de Counce et al. (2000) é amplamente utilizada no Sul de Brasil (STELA de FREITAS et al., 2006; MEZZOMO, 2009; EMBRAPA, 2009) e sua aplicação nesta Tese em geral foi apropriada, porquanto seria recomendável sua difusão na Região, tanto para identificar momentos de ocorrência de estádios fenológicos como para adotar práticas de manejo. A maior complicação foi identificar exatamente R7 e R8 devido a segundo Counce et al. (2000), o primeiro estágio ocorre quando pelo menos um grão da panícula do colmo principal tem casca amarela, no entanto em R8 pelo menos num grão da panícula do colmo principal a casca torna-se marrom, isto é, alcança a maturidade. Pelas diferenças de maturidade entre plantas, identificar pelo menos um grão com casca amarela ou marrom no colmo principal não resultou tão prático, e geralmente houve mais de um grão com essas cores quando foi definido R7 ou R8. Também em R8 foi observado que os grãos inferiores das panículas tenham a casca amarela e a massa dura. Entre R4 e R6 todos os grãos tem casca verde (COUNCE et al., 2000).

Por outro lado R8, segundo Counce et al. (2000) ocorre quando todos os grãos que conseguiram encher a lema e pálea alcançam a maturidade, ou seja, maturidade completa. Stela de Freitas et al. (2006) referem como R7 e R8 os

respectivos estádios R8 e R8 da escala de Counce et al. (2000). A confusão pode ser originada em que estes autores referem que seria frequente que a colheita pôde ser feita antes que ocorra o estágio R8. Nesta Tese foi considerado que em R8 cessou a acumulação de matéria seca, isto é, completou-se a maturidade fisiológica (COUNCE et al., 2000). Também neste estágio cessou a irrigação para todos os manejos da água, a diferença de Mezzomo (2009) que utilizou R7 como final da irrigação. Decidir se um ou outro estágio é melhor para terminar de irrigação poderia ser analisado em pesquisas posteriores e assim avaliar a diferença entre lâminas aplicadas, embora que a priori pareceria de pouca magnitude. Na região de San Javier a colheita ocorre com solo seco (sempre que não ocorram PP elevadas), quando os grãos atingem 22 a 24% de umidade, porquanto geralmente o estágio R9 é prévio à colheita.

Os resultados da fenologia na variedade Puitá INTA CL cultivado na região de San Javier indicam que, embora sejam utilizadas datas de semeadura com até 30 dias de diferença, variações moderadas da Tm e da RG ($\pm 10\%$) não modificam significativamente a duração dos estádios ontogênicos. Em floração a Tmin e Tmax diárias foram maiores a 12°C e menores a 40 °C respectivamente, portanto não haveria sido afetada a germinação dos grãos nos estigmas e tampouco haveria esterilidade das espiguetas devido a temperaturas (CHEBATAROFF, 1998). Também este autor indica que durante o período de enchimento dos grãos, Tmin deve ser maior de 18 °C para evitar perdas na massa dos grãos, o que ocorreu em ambas as safras. O atraso na floração no manejo AS (safra 2011-12) foi devido à deficiência hídrica que ocorreu no início do período reprodutivo, segundo indicaram os resultados de ETr. O atraso da floração também foi determinado por Wopereis et al. (1996) em variedades de arroz ANA na Ásia e Arf et al. (2001) em cultivares AE no Brasil. A duração do atraso foi de uma semana, e isso indicaria que ocorreu no período reprodutivo, se fosse no estágio vegetativo, o atraso seria ainda maior, entre três a quatro semanas (BOUMAN E TUONG, 2001).

Para avaliar a fenologia e ST obtidas em San Javier, foram determinados os estádios ontogênicos a partir das ST propostas em pesquisas feitas com Puitá INTA CL em Entre Ríos, Argentina (QUINTERO, 2009) e Sul de Brasil (EMBRAPA, 2009; PEREIRA da CRUZ et al., 2006) devido a esses autores terem avaliado o cultivar IRGA 417, antecessor do Puitá INTA CL (QUINTERO, 2009). Uma comparação

entre o período entre emergência e maturidade fisiológica em San Javier e Entre Ríos foi de 23 dias menor para a mesma variedade, e apenas 11 dias para o Sul de Brasil, ainda que com uma variedade semelhante (Tabela 46). Com Entre Ríos já houve diferenças no período vegetativo (9 dias) e foi semelhante ao Sul do Brasil. Essa semelhança com IRGA 417 e diferença com Entre Ríos continuou até floração (Tabela 46), sendo a maior diferença o período de enchimento dos grãos, entre R4 e R8, de 12 dias com Entre Ríos e 6 dias com o Sul de Brasil. Yoshida (1981) refere que as variedades indicas semi-anãs necessitam 30 dias para o enchimento completo dos grãos, porém, em San Javier e considerando os resultados de PG, essa diferença de dias não pareceria ser limitante para obter altas produtividades. Quanto as ST, totais e por período, em San Javier tiveram um comportamento intermédio, isto é, 9% inferior a Entre Ríos e 5% superior ao Sul do Brasil, considerando o ciclo completo, sendo semelhante até floração (Tabela 46). As principais diferenças com Entre Ríos ocorreram no estágio de enchimento dos grãos, tendo essa Região maior duração desse período. Por tanto em San Javier e para o cultivar Puitá INTA CL, quando a observação dos estádios ontogênicos é substituída pela ST obtida em outras regiões acarretam erros.

Tabela 46 - Dias Após da Emergência (DAE), e Somas Térmicas (ST) totais segundo estádios ontogênicos obtidos para o cultivar Puitá INTA CL em regiões de Entre Ríos (Argentina) e Sul do Brasil (IRGA 417)

Estádios ontogênicos	Entre Ríos *		Sul do Brasil **		San Javier	
	DAE	ST (°C d)	DAE	ST (°C d)	DAE	ST (°C d)
Emergência -R1	64	731	58	694	55	771
R1-R4	95	1.180	88	1.078	84	1.184
R4-R8	128	1.618	116	1.390	105	1.481

Nota - * Valores adaptados de Quinteros & Carfiel (2010), ** Steinmetz, et al. (2007) e EMBRAPA 2009

5.4.2 Evolução da biomassa aérea

O ciclo completo da componente BAT na safra 2011-12 correspondeu à clássica curva sigmóide nos tratamentos Ic e In, no entanto AS teve este comportamento até R2, sendo após muito afetada a acumulação de biomassa aérea pela deficiência hídrica e não alcançou o patamar. O máximo crescimento esperado da BAT, segundo Yoshida (1981) e Fageria (2007), seria em floração, ocorrendo isto em In e AS, no entanto em Ic a BAT já foi máxima no estágio R2 (Figura 78). Os

tratamentos AP e AT não foram apresentados devido a eles não ter diferenças estatísticas na evolução da biomassa aérea.

Em MeP e MP a componente BB+C teve um crescimento importante, sem diferenças entre manejos da água e MOA, sendo principalmente bainha, já que prévio a R1 o caule é pequeno, em torno a 1 cm. A bainha, além de soste a planta, neste estágio tem a tarefa de acumular temporariamente carboidratos para deslocar posteriormente aos grãos (FAGERIA, 2007). Para alcançar a máxima BAT em R2, também foi máxima a componente BB+C e, em geral, foi semelhante à média obtida no estágio seguinte, embora em R6 as panículas já tenham exserção completa e continue a mortandade dos colmos, indicando um processo de engrossamento e alongação destes e acúmulo de assimilados na bainha.

Na etapa de crescimento vegetativo, as lâminas das folhas superiores têm menor atividade fotossintética e dependem dos assimilados das inferiores, que quando estão totalmente expandidas realizam a maior fotossíntese (YOSHIDA, 1981).

No estágio R2, quando foi máxima a BFV em todos os manejos da água e MOA, é provável que os assimilados que fornecem as lâminas desloquem uma parte a BB+C e outra às panículas (FAGERIA, 2007). Entre R6 e R8, quando só restavam quatro lâminas verdes nos tratamentos com inundação e três em AS (safra 2011-12), todos os assimilados poderiam se deslocar para as panículas. Assim, as diferenças apresentadas na quantidade de grãos férteis por panícula no manejo AS, dever-se-ia principalmente à menor BFV em R6, isto é, problema na fonte. Yoshida (1981) e Fageria (2007) referem que no período de enchimento dos grãos é muito importante a intensidade da luz porque entre 60 a 100% dos carboidratos deslocados desde as lâminas aos grãos são produzidos pela fotossíntese. Além disso, as lâminas são a principal fonte para remobilizar N à panícula, porquanto é desejável que duas ou três das lâminas superiores tenham senescência devagar para permitir uma fotossíntese ativa e assim encher os grãos até maturidade fisiológica (YOSHIDA, 1981). Isto estaria em concordância com a maior perda de biomassa entre R6 e R8 em AS (Figura 78) devido a quando as folhas não fornecem suficiente quantidade de assimilados, eles rapidamente podem ser fornecidos pela bainha e caule, que tem habilidade de armazenar assimilados antes da floração (FAGERIA, 2007).

Figura 78 – Curva de crescimento da biomassa aérea total (BAT) e da palha (BPa) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (lc), inundação intermitente (In) segundo diferentes estádios ontogênicos, iniciação do perfilhamento (IP), máximo perfilhamento (MP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000) para a cultura de arroz da safra 2011-12 em San Javier, Argentina

Na safra 2012-13, a curva de crescimento não foi sigmóide devido a depois de R6 as plantas continuaram crescendo, e assemelha-se a uma curva linear. Isto ocorreu tanto nos tratamentos com DA, nos quais houve diferenças estatísticas entre a testemunha e as doses T1 e T2 (Figura 79), quanto aos manejos da água, que resultaram muito semelhantes (Figura 80). O anterior indicaria que as condições específicas do agro-ecossistema Tç haveriam impactado no desenvolvimento geral da cultura nesta safra, antes que as variáveis ambientais (RG, Tm, Tmax, Tmin, PP). Nos sucessivos tópicos serão discutidas as razões deste comportamento.

A taxa entre S-IP na safra 2011-12 foi feita no começo da irrigação, por isso foram menores que na safra seguinte, com a primeira medição de biomassa feita com plantas mais desenvolvidas (Tabela 46).

Figura 79 – Curva de crescimento da biomassa aérea total (BAT) e da palha (BPa) para testemunha (T0) e doses de N T1 e T2 segundo diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), para a cultura de arroz da safra 2012-13 em San Javier, Argentina

Figura 80 – Curva de crescimento da biomassa aérea total (BAT) e da palha (BPa) para os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic), inundação intermitente (In) segundo diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), para a cultura de arroz da safra 2012-13 em San Javier, Argentina

Entre ambos os valores da TCBAT de S-IP/MeP encontram-se os referidos por Fageria e Baligar (2001) para 150 kgN ha^{-1} (Tabela 47) em arroz ANA cultivado no ambiente tropical. Isto indicaria que na etapa inicial não houve limitantes ao

crescimento normal da cultura, sendo provável que as chuvas de novembro (2011) permitiram que a compactação do PlaNa evidenciada antes da irrigação não tivesse impacto no desenvolvimento das raízes.

Entre IP-MP houve um aumento notável da TCBAT na safra 2011-12, coincidente com o início da irrigação e adubação, e muito maiores aos referidos por Fageria e Baligar (2001) (Tabela 47). Este efeito foi observado no campo, onde as plantas aumentaram rapidamente a superfície coberta do solo. Segundo os componentes da biomassa aérea analisados na etapa vegetativa para ambas as safras, houve limitantes para o normal crescimento da cultura só em T0 (safra 2012-13), tendo os restantes tratamentos e manejos da água condições apropriadas para o crescimento dos perfilhos. O manejo AS neste estágio, em ambas as safras, teve diferenças significativas em relação aos manejos com inundação, cuja origem seria a maior disponibilidade de N, devido às condições de aeração deste manejo, que aumentaria a mineralização da MO com NO_3 como fonte. Isto permitiu aumentar significativamente $\text{N}^\circ\text{colmos m}^{-2}$ e, na safra 2012-13, teve maior biomassa aérea (BB+C, BAF e BAT), ainda que somente as duas últimas com diferenças estatísticas. O maior N disponível nesta safra não incrementou o número de colmos, mas haveria permitido acumular maior biomassa, principalmente nas lâminas (BELDER et al., 2004; RUSSELL et al., 2006; FAGERIA, 2007; COSTA FRANÇA et al., 2008; LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL et al., 2008). Reforça o argumento o fato que, neste estágio, o manejo In teve maior BFV que Ic, embora sem diferença estatística, havendo tido In também condições de aeração no solo RegAb. As argumentações nesta etapa são complexas devido ao efeito de manejos contrastantes (saturação/não saturação) da água sob a mineralização/imobilização do N e também o predomínio de amônio ou nitrato (TAO et al., 2006).

Entre MP-R2 (safra 2011-12) a TCBAT continuou sendo muito alta, no entanto entre MeP-R2 (safra 2012-13) foi 41% menor à safra anterior. Isto se deveu à maior quantidade de colmos na primeira safra, os que continuaram crescendo, e também à maior taxa de mortandade de perfilhos na safra 2012-13. Ainda com TCBAT menores, foram maiores a $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ referida por Fageria e Baligar (2001) e as plantas estiveram com adequado desenvolvimento.

Tabela 47 – Taxas de crescimento da biomassa aérea total (TCBAT) segundo diferente estádios ontogênicos e ciclo completo para as safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Argentina

safras	Estádios ontogênicos					Ciclo completo
	S-IP/MeP	IP-MP	MeP/MP-R2	R2-R6	R6-R8	
	TCBAT kg ha ⁻¹ d ⁻¹					
2011-12	10,1	139,5	368,4	289,7	-131,8	167,9
2012-13	36,9	*	218,1	219,0	400,1	166,8
Fageria e Baligar (2001)	(0)-14,2 (150)- 20,5	38,6 58,1	78,0 142,3	136,3 180,9	-86,3 -147,2	sd

Nota – * na safra 2012-13 teve uma medição menos de biomassa

S, semeadura; IP, iniciação perfilhamento; MeP, mediados de perfilhamento; MP, máximo perfilhamento; R2, R6 e R8 segundo escala de Counce et al. (2000).

(0) e (150) referem à testemunha e 150 kgN ha⁻¹ respectivamente

sd não foram apresentados dados de BAT na maturidade fisiológica

A única interação entre os manejos da água e a adubação em ambas as safras ocorreu no estágio R2 da safra 2012-13. A interação foi principalmente nas componentes BFV e N°colmos m⁻², mas com repercussão na BAT, e se bem que a interação ocorreu no estágio R2, as causas originaram-se no perfilhamento. As razões não foram deficiências hídricas por quanto as irrigações foram feitas adequadamente em todos os manejos e têm relação com a adubação (N). Em geral a testemunha, independentemente dos manejos da água, teve a maior mortandade de colmos e menor biomassa de lâminas per colmo, devido à insuficiência de N para manter a atividade dos perfilhos (RUSELL et al., 2006; FAGERIA et al., 2007). A aplicação da dose T1 no manejo AS não haveria sido suficiente para aumentar a sobrevivência dos perfilhos, mas sem permitiu incrementar a biomassa das lâminas por colmo, no entanto, com a dose T2 aumentou tanto a sobrevivência quanto a biomassa das lâminas.

Em síntese, no manejo AS em R2 houve resposta linear da BFV às aplicações de N e necessitou maior dose (T2) para diminuir a mortandade de perfilhos. Semelhante comportamento da BFV ocorreu no manejo In, ainda que com incrementos menores a AS, mas a sobrevivência dos perfilhos foi maior em T1, no entanto T2 teve a mesma mortandade que T0. A explicação disto seria que, embora em T1 houve maior N°colmos m⁻² que T2, eles tiveram menor biomassa nas lâminas, isto é, conseguiu-se um equilíbrio entre colmos e biomassa nas lâminas. A resposta das plantas no manejo Ic à aplicação de N, também em R2, foi muito errática e provavelmente alguma das diferenças determinadas em MeP tenham continuidade. Com a dose T1 aumentou a sobrevivência de perfilhos e as lâminas tiveram maior biomassa, porquanto também aumentou o conjunto da BFV. Com T2 manteve-se a

sobrevivência, mas diminuiu a componente BFV devido à menor biomassa das lâminas per colmo. A menor biomassa das folhas significa deslocamento a outros órgãos, que ocorre desde as lâminas localizadas nos centros ativos fisiologicamente, nas quais a fotossíntese é máxima (YOSHIDA, 1981) para a folha bandeira, que em R2 está em plena expansão, além da panícula, que está em pleno crescimento. Por outro lado, a componente BB+C não estaria ainda deslocando assimilados devido a não ter diferenças estatísticas entre T1 e T2 e sua função principal nesta etapa seriam acumular carboidratos na panícula e soste os colmos (YOSHIDA, 1981).

Quanto à safra 2011-12, no estágio R2 o manejo AS continuou com deficiência hídrica, além de atraso na fenologia, o que impactou na menor biomassa da componente BB+C, com diferenças estatísticas em relação à Ic. Isto implicou menor crescimento da panícula e acumulação de assimilados, com repercussão na produtividade, demonstrado com a correlação positiva e altamente significativa entre PG e BB+C neste estágio.

O crescimento da BAT continuou entre R2-R6, ainda com menores taxas na safra 2011-12 e semelhantes à MeP-R2 na safra 2012-13 (Tabela 47). Na safra 2011-12 o manejo Ic teve menor TCBAT que o resto ($128 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), provavelmente devido a no estágio R2 este manejo teve a maior TCBAT (423%) e já em R6 haveria uma estabilização do crescimento (Figura 78). Humphreys et al. (2006) referem taxas entre iniciação da panícula e floração entre 250 a $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para cultivares ANA com Ic no sudeste de Austrália, no entanto também para variedades ANA, igual estágio e Ic, mas na China, Tao et al. (2006) referem entre 211 a $260 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ e valores de $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ tanto para Ic quanto no In (LU, OOKAWA e HIRASAWA, 2000). Os valores da TCBAT da safra 2011-12 aproximam-se mais a estes resultados, embora na safra 2012-13 estiveram acima.

Na safra 2012-13, em R6, houve diferenças estatísticas na BFV entre AS (maior) e Ic, continuando a tendência dos outros estágios fenológicos, e indicaria provável diferença na disponibilidade do N em estágios anteriores ou também poderia significar algum atraso no deslocamento às panículas. Porém, considerando a importância das lâminas no enchimento dos grãos, as diferenças nelas deveriam se refletir na BP, situação que não ocorreu, por quanto o manejo AS teve a menor BP em relação aos outros manejos, ainda que sem diferenças estatísticas, reforçando a ideia de menor deslocamento de assimilados desde lâminas e bainha. Neste mesmo estágio, mas na safra 2011-12, AS foi o manejo com menor BFV e

maior BFS. A senescência das lâminas responde a um processo natural de envelhecimento das folhas (FAGERIA, 2007) e está diretamente relacionada com enchimento dos grãos, porquanto uma maior taxa de senescência indicaria maior rapidez de deslocamento de assimilados aos grãos, embora a deficiência hídrica aumente a senescência das folhas, reduzindo o dossel (BOUMAN e TUONG, 2001), além de ser um indicador de estresse ambiental ou de solo (YOSHIDA, 1981) e, no caso de AS, hídrico. Porém, a correlação PG-BFS foi negativa, ainda que não significativa, na safra 2011-12 e positiva e não significativa na seguinte, sem indicar uma tendência regular.

A TCBAT média do ciclo completo para todos os tratamentos, desde semeadura até maturidade fisiológica (117 e 116 DAS para as safras 2011-12 e 2012-13 respectivamente) foi quase igual em ambas as safras (Tabela 47). Na primeira safra foi o manejo AS o que diminuiu a média geral, no entanto na seguinte foi a testemunha, daí a similitude entre ambos os resultados. No entanto, as diferenças entre manejos da água nos estádios vegetativo e reprodutivo entre AS e Ic na safra 2012-13, não foram refletidos na produtividade. Katsura et al. (2008) reportam uma taxa média também de $165 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para Yunam (China) e $116 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para Kyoto (Japão) para variedades de arroz ANA de alta produtividade. Em função do discutido pode-se inferir que surge que em San Javier seria possível alcançar altas produtividades de arroz casca.

Na bibliografia é comum referir ao termo *shoot* como a soma das componentes BFV, BFS e BB+C, equivalente também a BPa, e seu cálculo serve para comparar os estádios finais de crescimento, e também com resultados de outros trabalhos. Na safra 2011-12, para o estádio R6, nos manejos com inundação e AS, aquela soma foi 15,35 e 16,37 Mg ha^{-1} , diminuindo a 10,04 e 7,75 Mg ha^{-1} , respectivamente, em R8, daí a TCBAT negativa (Tabela 47), indicando deslocamento de assimilados em todos os manejos da água. Na safra 2012-13, a soma média de todos os tratamentos da biomassa dos colmos foi de 9,09 Mg ha^{-1} , apenas 60% da média da safra anterior, apesar de não ter deficiência hídrica nenhum dos estádios fenológicos e, a diferença da safra 2011-12, as lâminas de água aplicadas por aspersão tiveram adequada infiltração no perfil. Estas diferenças de crescimento na safra 2012-13 em relação a 2011-12 foram devidas à menor quantidade de perfilhos na etapa de crescimento vegetativo, aspecto que será discutido no tópico específico de perfilhamento. Confirma isto os valores individuais

da biomassa dos colmos (BFV+BB+C+BFS) que foram semelhantes em ambas as safras: 1,74, 2,42 e 1,93 g colmo⁻¹ nos estádios R2, R6 e R8 respectivamente da safra 2011-12 e 1,73, 1,91 e 1,88 g colmo⁻¹ para os mesmos estádios na safra 2012-13.

Além do anterior, se na safra 2012-13 houvesse ocorrido o comportamento da curva sigmóide, não haveria crescimento da BAT desde R6 até R8 e a biomassa dos colmos diminuiria devido ao deslocamento às panículas. Isto não ocorreu (Figura 78), e o crescimento permitiu alcançar em R8 valores da BAT inclusive maiores aos da safra 2011-12 (Tabela 47) sendo T2 e T1 da safra 2011-12 maior a I_n e I_c da safra 2011-12. Este crescimento tão importante entre R6 e R8 foi, em sua maioria, acumulado na BP, representando o 84% do crescimento total. A TCBP da safra 2012-13 foi de 250 kg ha⁻¹ d⁻¹ para T0 e 430 kg ha⁻¹ d⁻¹ para T2, no entanto nos manejos da água tiveram médias de 334 kg ha⁻¹ d⁻¹. Na safra 2011-12, a média da TCBP foi semelhante, 326 kg ha⁻¹ d⁻¹, com máximos nos manejos com inundação, 360 kg ha⁻¹ d⁻¹ e mínimos em AS, com 260 kg ha⁻¹ d⁻¹. Yoshida (1981) relata taxas de crescimento dos grãos menores, de 100 kg ha⁻¹ d⁻¹, para arroz ANA em clima tropical. Isto dever-se-ia ao maior período de enchimento dos grãos -30 dias segundo este autor- porquanto para alcançar produtividades de 6 a 8 Mg ha⁻¹, em 30 dias acumular-se-ia até 3 Mg ha⁻¹.

Houve diferenças significativas da BP em AS para o estádio R6 da safra 2011-12 devida à menor massa individual das panículas antes que à quantidade total delas – $N^{\circ}Pan\ m^{-2}$ foi semelhante em todos os manejos da água-, sendo as médias dos tratamentos AS, I_c e I_n , supondo que todos os colmos foram férteis, 0,49, 0,65 e 0,68 g pan⁻¹ respectivamente. A diferença significativa em R8 entre AS e os manejos com inundação, nesta mesma safra, foi devido principalmente à menor quantidade de panículas, com origem na maior mortandade de colmos e também à menor quantidade de grãos férteis, ambos devido à deficiência hídrica (BOUMAN e TUONG, 2001).

Yoshida (1981) refere que o deslocamento dos carboidratos acumulados nos órgãos vegetativos antes da floração, para completar o enchimento dos grãos, varia entre 0 a 71%, dependendo da aplicação do N e da densidade de plantas. Na safra 2011-12, o crescimento das panículas entre R6 e R8 seria devido parte ao deslocamento desde lâminas e colmos (Figura 78) e parte à fotossíntese das lâminas superiores. Confirma o anterior a perda de biomassa aérea entre R6 e R8

que foi, em média, de 41%, sendo AS o manejo que teve maior perda (53%), no entanto nos manejos com inundação foram em torno de 35%. Este último foi igual ao referido por Fageria (2007) e similar aos obtidos também por Fageria e Baligar (2001), em torno de 32%. A correlação PG-BP foi positiva e significativa, o que permite inferir que as variações de BP entre tratamentos não foi alterada no período de enchimento dos grãos, isto é, cada manejo da água manteve a mesma posição relativa aos outros, entre ambas as medições. No entanto, a correlação PG-BB+C (R6) foi negativa, embora não significativa, ao contrário do estádio R2. A razão disto possivelmente seja a importante mortandade de perfilhos ocorrida entre R6 e R8, particularmente em AS.

Na safra 2012-13 pareceria ser que o deslocamento desde órgãos vegetativos foi baixo, devido a BB+C também ganhou massa, ainda que levemente (Figuras 79 e 80). A diferença da safra 2011-12, o aumento da componente BP haveria sido pela produção de carboidratos fornecidos através da fotossíntese das lâminas (FAGERIA, 2007), e isso só pôde ocorrer com uma forte absorção do N, indicando que as raízes neste momento teriam alta atividade. Osaki et al. (1997) desenvolveram hipóteses sob a interação raízes-colmos para obter alta produtividade em cultivos a campo, sendo a absorção do N fundamental neste processo. No estádio R6 da safra 2012-13, a média da BFV representou só 66% em relação à safra anterior e, ainda que muito menores, haveriam sido suficientes para fornecer assimilados e deslocar às panículas. A RG é o principal determinante climático da produtividade (YOSHIDA, 1981), resultando ótimo entre R6 e R8 (356 MJ m^{-2} , $25,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) nesta safra, no entanto na anterior foi menor (294 MJ m^{-2} , $21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Nesta safra, as correlações PG-BP e PG-BB+C (R6) foram opostas à safra anterior, isto é, a primeira não foi significativa e a segunda foi positiva e altamente significativa. Com similar razoamento feito para a safra 2011-12, a falta de significância da BP indicaria que, no período de enchimento dos grãos, teve muita importância os assimilados obtidos através da fotossíntese, antes que a biomassa acumulada em estádios prévios, porque a BP na testemunha em R6 não teve diferenças significativas com as doses T1 e T2, ainda que PG em T0 foi significativamente menor em relação a T1 e T2. Também a componente BP da dose T2, em R6, foi significativamente menor a T1 e na colheita ocorreu o contrário, T2 superou a T1. A falta de correlação não significa menosprezar a biomassa das panículas no estádio R6, que representou quase o 50% da PG. Por outro lado, a alta

correlação positiva da BB+C seria devido à quase nula mortandade de colmos entre R6 e R8.

5.4.3 IAF e AFE

A importância da determinação do IAF consiste em que ele é um indicador da fotossíntese, sendo necessários altos valores para interceptar a radiação solar incidente (LU, OOKAWA e HIRASAWA, 2006). Isto se reflete na produtividade, corroborado através da correlação significativamente positiva entre PG e IAF, em todos os estádios onde foi determinado IAF e em ambas as safras. Além disso, na fotossíntese também influi a orientação das folhas do dossel. As lâminas eretas permitem menor interceptação e pelo tanto a luz pode alcançar as lâminas inferiores, e assim haverá no dossel maior área foliar (AF) disponível para a fotossíntese (YOSHIDA, 1981). As lâminas horizontais captam maior radiação individual, mas só uma pequena quantidade de AF pode realizar fotossíntese no dossel. O ideal seria que as lâminas superiores sejam eretas para permitir a passagem da luz e as inferiores horizontais, para captar maior radiação (FAGERIA, 2007). As variedades de arroz índicas semi-anãs modernas apresentam lâminas eretas e finas, sendo a variedade Puitá INTA parte deste grupo (QUINTERO, 2009).

Na safra 2011-12, no estádio MP, houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) de IAF entre os manejos de inundação e AS, ainda que neste estádio a BFV fosse semelhante em todos os manejos. Para explicar isto haveria dois supostos. Por um lado, Cabuslay et al. (2002) demonstraram que a deficiência hídrica no estádio vegetativo afeta a expansão das folhas e provoca menor crescimento de sua superfície, embora sem prejudicar a acumulação de massa seca. A segunda explicação seria que, devido à componente $N^{\circ}\text{colmos m}^{-2}$ ser significativamente maior no manejo AS, sempre em MP, a área média das lâminas seriam menores, isto é, folhas menores. Para avaliar IAF foram obtidas sub-amostras de igual quantidade de lâminas, porquanto as medições de AF da alíquota AS resultaram menores. Analisando Sf_{aliq} e biomassa das lâminas da alíquota, no estádio MP da safra 2011-12, se o suposto de estresse hídrico fora certo, a Sf_{aliq} teria diferenças significativas com I_n e I_c , embora a biomassa das lâminas fosse semelhante, e com a segunda suposição ambas as variáveis teriam diferenças significativas. Feito a análise da variância e corroborado o suposto de normalidade, Sf_{aliq} e a biomassa das

lâminas tiveram diferenças significativas ($p < 0,05$), indicando que ainda não seriam manifestados problemas de deficiência hídrica no manejo AS, embora sim de crescimento individual das folhas, que condicionaram o comportamento ao longo do ciclo. Corroborando que no período vegetativo não houve deficiência hídrica no manejo AS o fato que, se isto fosse certo, o atraso da floração deveria haver sido entre três a quatro semanas (BOUMAN e TUONG, 2001). Por outro lado, na safra 2012-13 o IAF em MeP foi muito menor aos determinados em MP da safra anterior e, ainda que em aquele estágio não fosse alcançado o máximo perfilhamento, as diferenças radicaram principalmente na menor quantidade de colmos antes que problemas no desenvolvimento da cultura. A correlação PG-IAF para este estágio foi significativamente positiva em ambas as safras, com valores nos coeficientes algo maiores na safra 2011-12.

Na medição feita em R2 a folha bandeira, última da planta, está em processo de plena expansão e, além dela, outras 4 lâminas verdes de grande tamanho, em média, estavam totalmente expandidas, porquanto a componente BFV foi a máxima determinada no ciclo em ambas as safras. A maior massa das lâminas foi correspondida com uma maior superfície, porquanto em R2 também foi máximo o IAF, mas na safra 2012-13 houve 64% dos colmos em relação a 2011-12, e somente T2 alcançou valores de IAF similares aos de esta safra. Porém, a correlação PG-IAF e PG-BFV para este estágio foi significativamente positiva em ambas as safras, com maiores valores dos coeficientes em 2012-13. O estágio R2 não seria o de maior IAF do ciclo já que durante a exserção da panícula (R3) a folha bandeira está plenamente expandida (COUNCE et al., 2000) porquanto neste estágio seria alcançado o máximo IAF, com 5 grandes lâminas plenamente expandidas (YOSHIDA, 1981) e declinando depois de devido à senescência das folhas. Na safra 2011-12, em R2, se mantiveram as diferenças significativas de $S_{f_{aliq}}$ e biomassa das lâminas individuais entre AS e os manejos com inundação, sem diferenças estatísticas em nível de cultura devido a que foram compensadas por maior quantidade de colmos.

Em R6 da safra 2011-12, houve diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em IAF e também na BFV, no nível de cultura, entre AS e os manejos com inundação, originado num maior aumento da BFS decorrente com deficiência hídrica. Estes menores valores de IAF poderiam ter impacto na evaporação do solo, porquanto as diferenças estimadas de E_{Tr} entre AS e os manejos com inundação, no período de

R4 a R8, haveriam sido ainda maiores, confirmando o suposto que um forte estresse hídrico ocorreu no final do período de enchimento dos grãos. Na safra 2012-13 os valores de IAF em R6 resultaram quase a metade que na safra anterior, principalmente devido à menor quantidade de N°colmos m^{-2} (15% menor) já que a nível individual, as lâminas dos colmos tiveram número e dimensões semelhantes. A particularidade nesta safra foi o manejo AS quem teve o maior valor de IAF, ainda sem significância. Além disso, a correlação entre PG-IAF e PG-BFV foi significativamente positiva em ambas as safras, com maiores valores em 2011-12.

Maiores valores de IAF no nível de cultura nos estádios R2 e R6, e também mais BFV pela relação linear entre ambas, não necessariamente implica altas taxas de crescimento das panículas. Isto dependerá da resultante entre a fotossíntese das lâminas que ficam verdes com a respiração dos diferentes órgãos que convivem na planta, os reprodutivos com respiração de crescimento e os vegetativos com respiração de manutenção (YOSHIDA, 1981). O manejo AS teve folhas com menor área desde o período vegetativo e, portanto com menor taxa de fotossíntese para sustentar a respiração. Em condições de deficiência hídrica, a área foliar e a fotossíntese dessas lâminas seriam ainda menores (BOUMAN e TUONG, 2001; CABUSLEY et al., 2002) e não haveria conseguido sustentar a respiração dos demais órgãos, sobrevivendo a senescência dos colmos.

Determinar valores críticos de IAF nos diferentes estádios que permita a máxima taxa de crescimento da biomassa aérea foi avaliado por diferentes autores, ainda que, devido à relação fotossíntese-IAF é de tipo curvilíneo, a TCBAT alcança um valor ótimo antes que seja alcançado o máximo IAF (YOSHIDA, 1981). Este autor reporta valores de IAF crítico entre 5-6 até máximos de 10 durante a exsurgência da panícula (R3), com 5 lâminas verdes de grande tamanho, permitindo até o 95% da interceptação da luz incidente no dossel e máxima atividade da fotossíntese. Katsura et al. (2008) reportaram valores mínimos (Kyoto, Japão) e máximos (Yunam, China) de IAF em R3 de 3,5 e 8,8 respectivamente, para variedades de arroz ANA que tiveram produtividades de apenas 3,5 até 11,9 $Mg\ ha^{-1}$, relacionadas a esses valores de IAF. Thakur et al. (2011) obtiveram produtividades de 6,5 $Mg\ ha^{-1}$ com IAF de 3,95 na floração e para variedades de arroz AE, região dos Cerrados, GO, Brasil, Fageria (2007) reporta valores ótimos de IAF de 2 a 3 entre 85 a 100 DAS.

Os anteriores valores de IAF críticos foram superados na safra 2011-12 por todos os manejos da água já em R2, apenas dias antes de R3, no entanto a média

de IAF no Ic (safra 2011-12) esteve muito próxima ao máximo de 10 antes mencionados. Valores de IAF superiores não permitiriam a passagem suficiente da radiação, denominado ponto de compensação da luz (YOSHIDA, 1981), para que as lâminas inferiores possam realizar a fotossíntese, ainda para variedades com folhas eretas.

Por outro lado, IAF igual a 4 em R6, em variedades de arroz ANA, seriam suficientes para produzir 5-9 Mg ha⁻¹ de arroz em casca (LU, OOKAWA e HIRASAWA et al., 2000; THAKUR et al., 2011), sendo este limite superado por todos os manejos da água na safra 2011-12. Na safra 2012-13, os manejos Ic e In tiveram IAF menores, sendo AS o único que superou aquele valor. Porém, as produtividades nos manejos In e Ic não foram diminuídas em relação a AS, nem tampouco em relação à safra 2011-12. Isto dever-se-ia a no período de enchimento dos grãos a principal fonte de assimilados, para todos os tratamentos, foi a fotossíntese das folhas verdes antes que o deslocamento de carboidratos acumulados em bainha e colmos. Considerando que neste estágio houve quatro lâminas verdes, as três superiores aportaram diretamente às panículas, no entanto a inferior haveria exportado os assimilados às raízes (YOSHIDA, 1981), permitindo adequada inter-relação raízes-colmos (Samejima et al., 2004).

Nas medições de IAF no estágio vegetativo da safra 2011-12 não houve relação linear entre IAF e BFV. Uma explicação seria que durante o crescimento ativo dos órgãos vegetativos (até R2) da escala de Counce et al. (2000), as lâminas superiores estão em expansão, têm menor participação na fotossíntese e no fornecimento de assimilados, dependendo dos assimilados das folhas inferiores, incluída a bainha, para seu crescimento (YOSHIDA, 1981). Por isso haveria área crescente de lâminas (aumento de IAF), mas a biomassa não seria incrementada com a mesma taxa. No caso de AS, houve muitas lâminas para acrescentar a componente BFV, embora menores, por isso a maior BFV os valores de IAF não aumentaram (Figura 45). Já na safra 2012-13, com menor N°colmos m⁻², a relação IAF-BFV na etapa vegetativa foi linear, com cociente angular da reta de 2,59.

Nos estádios R2 e R6 as lâminas que ainda ficam verdes já não crescem, todos os assimilados produzidos pela fotossíntese neta deslocam aos grãos e, se também não há perda de biomassa, há relação linear da BFV com o IAF. No estágio R2 do manejo AS (safra 2011-12), ainda manifesta-se a redução da superfície das lâminas, porquanto não houve relação linear. Na safra 2012-13 o coeficiente angular

no período reprodutivo diminuiu a 1,85, indicando perda de biomassa porquanto a contribuição no IAF da BFV foi menor. A razão seria deslocamento de assimilados a bainha e colmo em R2 e às panículas em R6.

Os coeficientes angulares das retas da relação IAF-BFV nas safras 2011-12 e 2012-13, no período reprodutivo, foram 2 e 1,85 respectivamente, porquanto a média entre ambos os seria apropriado para a variedade Puitá INTA CL.

A área foliar específica (AFE) representa a relação da superfície com a biomassa das lâminas e determina a grossura da folha, porquanto sua evolução depende do IAF, isto é, na medida em que na cultura aumenta o IAF, também deveria incrementar a AFE, mas também da BFV. Na etapa vegetativa da safra 2011-12 a AFE foi elevada (média de $40 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) devido aos valores pequenos de IAF embora muito menores em proporção de BFV. Isto seria como consequência da grande quantidade de perfilhos que houve no estágio MP, com folhas pequenas, tanto em tamanho quanto a biomassa. Já em R2 alcançou um valor estável em torno de $20,5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. Na safra 2012-13, no período reprodutivo, foi algo menor a safra anterior ($18,5$ contra $20,8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$), corroborando certa perda de biomassa nas lâminas. Yoshida (1981) refere valores de AFE entre 20 a $45 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ e, ainda que o autor não mencione o momento do ciclo que foram obtidos, resultaram semelhantes aos obtidos em R6 e MP respectivamente.

Por outro lado, nem IAF nem AFE foram afetadas pela aplicação parcelada do N, não coincidindo com outros trabalhos científicos. Para retrazar a senescências das folhas, isto é, alcançar a máxima quantidade de lâminas verdes no momento de enchimento dos grãos, Fageria (2007) refere que aplicações do N em R2 ou floração manteve as lâminas de arroz mais verdes durante o enchimento dos grãos, ainda que sem acrescentar a produtividade. O mesmo autor refere que, segundo Oritani (1995), a adubação com N em R1 incrementa fortemente a área foliar do arroz. Katsura et al. (2008) encontraram diferenças no IAF com aplicações divididas do N em R1, R2 e R3 da escala de Counce et al. (2000).

Porém, no manejo AS a adubação parcelada teve maior impacto no IAF que nos outros manejos, devido ao tratamento AP-AS apresentar maiores valores que AT-AS no estágio MP, indicando que, ante condições de deficiência hídrica, a adubação parcelada permitiria afrontar melhor as adversidades (WESTCOTT et al., 1986).

Houve nítida diferença entre as doses T1, T2 e a testemunha em todas as medições, refletindo o aporte da adubação com N na resposta ao IAF, do mesmo

modo que o comportamento da BFV, devido à relação linear entre ambas as variáveis. A resposta do N ao incremento da BFV e IAF foi determinada por diversos autores (BELDER et al., 2004; RUSSELL et al., 2006; FAGERIA, 2007; COSTA FRANÇA et al., 2008; LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL, 2008). Belder et al. (2004) determinaram IAF máximo igual a 10 para arroz ANA com irrigação contínua e adubação com 180 kgN ha^{-1} em Tuanlin, China, e apenas um máximo de 3 para a testemunha. A diferença tão ampla deve-se a pouca fertilidade desse solo, com até três colheitas anuais de arroz.

Não houve interação significativa no IAF e AFE, para nenhum dos estádios, entre DA e manejos da água, a diferença da biomassa aérea no estádio R2 (safra 2012-13), sendo as prováveis razões discutidas no tópico interação- manejos da água-adubação com N-mineralização da MO.

Belder et al. (2004) reporta diferenças estatísticas no IAF entre o manejo I_eS e I_c com altas doses de N (180 kgN ha^{-1}) devido ao Ψ_m oscila entre 0 e -10 kPa. Lu, Ookawa e Hirasawa (2000), também determinaram diminuição da expansão foliar quando o potencial do solo ficou em torno de -10 kPa. Isto não ocorreu na safra 2012-13, nem com o manejo I_n nem com manejo AS ambos em condições de solo não saturado e potenciais em torno a -10 kPa.

Para estimar IAF a campo num certo estádio, R6, por exemplo, uma metodologia rápida seria selecionar uma superfície com plantas uniformes, contar os colmos e estimar uma média das lâminas verdes presentes neles. Após disso, medir largura e comprimento de algumas lâminas e fazer uma média para aplicar a eq. (38). Com este valor de AF individual, multiplicado pela quantidade de lâminas e de colmos, obter-se-ia a AF (cm^2), que dividida pela superfície conhecida, também em cm^2 , permitira estimar o IAF. Esta informação seria útil para após também estimar, em condições de campo, uma produtividade esperada.

Também pode ser estimado o IAF a partir da curva de regressão apresentada na Figura 81. A mesma foi obtida com a média dos valores de IAF dos manejos da água da safra 2011-12 e das doses T1 e T2 da safra 2012-13. O desvio padrão foi maior no estádio R6 devido às grandes diferenças entre ambas as safras, além de MP da safra 2011-12, estádio no qual também houve alta variabilidade entre manejos da água (Figura 81). Foi utilizado DAE para diminuir o valor negativo do coeficiente c da equação quadrática, que fisicamente não tem nenhuma significação.

Provavelmente com valores de IAF determinados na etapa inicial prévio ao perfilhamento (15 a 20 DAE com 2-3 folhas) o ajuste seria ainda melhor.

Figura 81 - Curva de evolução do índice de área foliar (IAF) segundo diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), máximo perfilhamento (M)) R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000), para a cultura de arroz das safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier, Argentina- Símbolo quadrados cor cinza representam os valores medidos de IAF, a curva cor negro o melhor ajuste determinado e as barras indicam o desvio padrão para cada estágio

5.4.4 Perfilhamento

A importância dos perfis consiste em que eles estão associados às panículas, uma das principais componentes da produtividade. Sua quantidade depende das condições de radiação, temperatura, nutrição, cultivar e espaçamento entre fileiras (YOSHIDA, 1981; FAGERIA, 2007). A evolução dos colmos teve algumas similitudes e diferenças entre safras. As semelhanças estiveram em relação ao máximo perfilhamento, que ocorreu prévio ao período reprodutivo (Figuras 82 e 83). Porém, houve importantes diferenças na evolução dos colmos porquanto foi considerada mais apropriada uma primeira discussão de cada safra e após realizar considerações gerais.

A safra 2011-12 caracterizou-se por alta quantidade de colmos em todos os estádios prévios à colheita (Figura 82), desde IP (média 823 colmos m^{-2}) que resultou superior aos determinados por Fageria (2007) para este estágio (506 a 632 colmos m^{-2} , 0 até 150 unidades do N respectivamente). Em MP continuou

aumentando, sendo o manejo AS quem teve o maior N°colmos m^{-2} , provavelmente devido a uma maior taxa de mineralização do N. Porém, em caso de pouca redistribuição da água no perfil do solo, os perfilhos mais jovens teriam raízes mais superficiais e pouco profundas, tornando-lhes vulneráveis em momentos de estresse hídrico, o que seria uma desvantagem para este manejo. Bouman e Tuong (2001) referem que, no caso de deficiência hídrica no período vegetativo, haveria menor quantidade de perfilhos, corroborando que não houve deficiência hídrica durante o período vegetativo em AS, devido ao valor de N°colmos m^{-2} deste manejo.

Após do início do estágio reprodutivo houve mortandade de perfilhos em todos os manejos, devido à concorrência por luz e nutrientes com colmos mais desenvolvidos (Fageria, 2007). A taxa média de diminuição de colmos em R2 foi de 28%, com mínimo de 19% em Ic e máximo de 33% em AS (Figura 82). Fageria e Baligar (2001) determinaram entre 540 e 660 colmos m^{-2} em R2, bastante abaixo de 927 colmos m^{-2} (média de todos os tratamentos).

Figura 82 - Evolução dos colmos desde emergência (E), início de perfilhamento (IP), máximo perfilhamento (MP), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) e colheita na safra 2011-12, San Javier, Argentina

No manejo AS, a maior mortandade deveu-se tanto a condições prévias dos colmos, isto é, lâminas de menor área e pelo tanto com menores possibilidades de concorrer, quanto à deficiência hídrica ocorrida, que acelerou a senescência dos colmos (BOUMAN e TUONG, 2001). Este estágio foi o único que teve diferenças

estatísticas entre I_n e I_c (componente BB+C, e BAT com $p < 0,05$, no entanto BFS, N°colmos m^{-2} e IAF menores, ainda que sem diferenças significativas). A componente que explica as diferenças foi N°colmos m^{-2} , isto é, houve importante quantidade de colmos que não conseguiram sobrevivência.

Em R6 a componente N°colmos m^{-2} foi considerada N°Pan m^{-2} e a média dos tratamentos foi 655. Continuou a mortandade de perfilhos (média de todos os tratamentos foi 29%). As causas da mortandade foram as mesmas que no estágio anterior, isto é, concorrência pela luz e nutrientes e deslocamento de assimilados às panículas, e deficiência hídrica no manejo AS. Fageria e Baligar (2001) determinaram entre 500 e 580 Npan m^{-2} neste estágio, com taxa de mortandade de 10 % em relação a R2. A maior taxa na safra 2011-12 se justificaria devido a, em R2, as plantas tiveram elevada quantidade de colmos.

A mortandade de colmos continuou sendo alta entre R6 e R8 (média de 23%, Figura 82), muito maior que 5% reportado por Fageria e Baligar (2001). Isto deveu ocorrer poucos dias após de R6, porquanto é provável que muitos perfilhos secundários ou terciários (mais jovens) não hajam tido suficiente vigor como para concorrer por luz e nutrientes. No caso de AS, a taxa foi ainda maior, de 33%. A causa provável foi o estresse hídrico, que debilitou ainda mais aos perfilhos menos desenvolvidos, especialmente aqueles com pouca densidade de raízes. Embora hajam sido aplicadas lâminas de irrigação suficientes como para satisfazer os requerimentos das plantas, seria provável que a água não estivesse disponível para sua absorção pelas raízes destes perfilhos, agravado ainda mais pela elevada RP do solo PlaNa. De modo semelhante na região de Texas (EEUU), considerando a irrigação (aspersão) mais as PP, o arroz (variedade ANA) teve no total do ciclo entre 1.060 -1.170 mm, sendo estas quantidades 30% superiores a ETr, embora a cultura diminuiu sua produtividade em relação ao manejo I_c (Mc CAULEY, 1990).

Considerando uma densidade média das plantas na emergência (safra 2011-12) de 181 pl m^{-2} , resultaria que em IP houve entre 4 a 5 colmos pl^{-1} , uma quantidade semelhante à referida por Yoshida (1981) para arroz com plantio direito (2 a 5 colmos pl^{-1}). Supondo igual nº plantas que na emergência, em MP haveriam-se aumentado a 7, diminuído a 5 em R2 e a 3,6 colmos pl^{-1} em R6, indicando que as adubações feitas desde semeadura, junto à disponibilidade de água, permitiram desenvolver muitos perfilhos que foram morrendo nos sucessivos estádios, o que significou perda de biomassa não produtiva. A quantidade média de panículas por

planta na colheita, supondo igual número que na emergência, resultou 2,7, ou seja, entre 2 a 3 panículas por planta.

As diferenças mais significativas entre a safra 2012-13 respeito à safra anterior foi, por um lado a menor quantidade máxima de colmos, e por outro a taxa de mortandade abrupta ao início do estágio reprodutivo (média de 39%), seguido de taxa quase nula até colheita (Figura 83).

Na menor quantidade de colmos na safra 2012-13 influiu a densidade de plantas na emergência, já que a quantidade média por planta ($7,4 \text{ colmos pl}^{-1}$) foi similar à safra anterior. Tao et al. (2006) também encontraram diferenças importantes nas quantidades de colmos no estágio de máximo perfilhamento (1000 e $650 \text{ colmos m}^{-2}$) devido a densidades de plantação contrastantes (160 e 106 pl m^{-2} respectivamente).

Figura 83 - Evolução dos colmos desde emergência (E), mediados de perfilhamento (MeP), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) e colheita na safra 2012-13, San Javier, Argentina

A menor disponibilidade de N na etapa vegetativa em T0 repercutiu na quantidade de colmos, embora estes individualmente apresentaram uma biomassa adequada para sobreviver e se desenvolver. Os máximos valores foram em MeP entre T1 e T2 (média de $1.035 \text{ N}^{\circ}\text{colmos m}^{-2}$), sem diferenças estatísticas entre estes, do mesmo modo que Fageria e Baligar (2001) também não encontraram

diferenças no número de colmos em arroz ANA para doses de 45 e 90 kg ha⁻¹ do N. As diferenças na testemunha indicariam que o aporte de N pelo solo não foi suficiente na etapa de perfilhamento ativo, permitindo a adubação com N aumentar em 22% o N°colmos.

Os valores médios de colmos em R2 para T0, T1 e T2 foram 512, 610 e 618 N°colmos m⁻². Fageria e Baligar (2001) determinaram, para igual estágio e com arroz ANA, 540, 600 e 597 N°colmos m⁻², para níveis de N semelhantes aos tratamentos, evidenciando que quase duplicar a adubação com N não implica aumentar significativamente o número de colmos. Após de MeP, e coincidente com o início da etapa reprodutiva, em todos os tratamentos houve alta mortandade de colmos (Figura 83) devido à concorrência pelos assimilados com os órgãos reprodutivos, variando entre 32 até 45%, maior sempre em T0. Essa maior taxa de mortandade indicaria carência de N para deslocar às panículas (Fageria, 2007). Por outro lado, a estabilidade dos colmos após de R2 é uma característica com poucos antecedentes na bibliografia. Fageria e Baligar (2001) referem perdas entre R2 e R8 entre 9 a 14%, lembrando que na safra 2011-12 a perda média foi de 44%. Tao et al. (2006) determinaram estabilidade de colmos após da floração, com médias em torno de 400 colmos m⁻².

Na colheita e no estágio R6 a mortandade de perfilhos foi desprezível em relação a R2 em todos os tratamentos (Figura 83), indicando um equilíbrio entre a quantidade máxima de panículas que suporta um dado marco de semeadura, disponibilidade de luz, temperaturas, água e nutrientes. Embora a testemunha fosse significativamente diferente a T1 e T2 nestes estádios, manteve a mesma quantidade de panículas, sendo o N fornecido a partir da mineralização do Nt disponível no início do ciclo, e que segundo os cálculos feitos seria de 120 kg ha⁻¹.

Não houve interação entre DA e manejos da água, nem diferenças estadísticas entre T1 e T2, havendo somente diferenças significativas do N°Pan entre Ic e In na colheita, ainda que sem implicância na produtividade. Com tudo, na colheita a média de NPan de todos os tratamentos foi maior que a média da safra 2011-12.

Além de Fageria e Baligar (2001), Quintero (2009) determinou para o cultivar Puitá INTA, 611 colmos m⁻² (média de quatro safras) em MP em Entre Ríos, sendo 50 e 42% menor aos obtidos nas safras 2011-12 e 2012-13 em San Javier. Mezzomo (2009) obteve resultados semelhantes aos desta Tese quanto a

perfilhamento. O autor também pesquisou os manejos Ic e In em variedades de arroz ANA no Sul do Brasil, determinando picos de 1.000 a 1.200 colmos m^{-2} respectivamente, e diminuindo a 608 Pan m^{-2} na colheita, sem diferenças estatísticas entre ambos os manejos. Tao et al. (2006) determinaram diferentes quantidades máximas de colmos (1.000 e 650 colmos m^{-2}) segundo densidades para em arroz ANA com inundação contínua na China, embora somente 560 e 420 Pan m^{-2} foram férteis na colheita. Estes autores consideram que, para condições agroecológicas na China, a quantidade de panículas na colheita, para variedades ANA modernas, seria entre 350 a 400 Pan m^{-2} .

Grande quantidade de perfilhos na etapa vegetativa não necessariamente seria recomendável devido a, em condições de semeadura em seco, há concorrência pela radiação e os nutrientes, além que a produtividade do arroz depende mais do colmo principal que dos perfilhos (YOSHIDA, 1981). Excessiva quantidade de perfilhos por planta, segundo os resultados obtidos, implicou lâminas menores, por conseguinte menor fotossíntese e possibilidade que muitos não completam a etapa reprodutiva, desaproveitando recursos de luz, nutrientes e água. Corroboram estes conceitos o fato que a correlação entre PG e N°colmos m^{-2} no estágio de perfilhamento ativo foi negativa na safra 2011-12, ainda que sem significância. Isto indicaria o impacto negativo do alto perfilhamento com origem na densidade de plântulas. Ao contrário, na safra 2012-13, a correlação foi positiva e significativa, mostrando a importância dos perfilhos durante o estágio vegetativo

A Figura 84 apresenta as duas safras, na qual pode se observar que os colmos por cima das respectivas retas não são produtivos porque morrem antes de formar a panícula. Na safra 2011-12 alcançou um maior pico dos colmos e a mortandade foi gradual, no entanto em 2012-13 teve menor quantidade de perfilhos embora com mortandade abrupta.

A gradualidade da mortandade de perfilhos na safra 2011-12, semelhante em todos os manejos da água, pôde se dever a melhores condições no fornecimento de N, devido ao solo PlaNá tem baixa percolação, com maiores proporções de amônio (TAO et al., 2006; WANG et al., 2001) disponível nas camadas mais superficiais e com maior densidade de raízes (YOSHIDA, 1981). Isto possibilitaria sua absorção em maior quantidade pelos colmos, resultando assim mais desenvolvidos para a concorrência por luz e nutrientes. Ao contrário, no solo RegAb, com maior percolação e aeração, haveria maior proporção de nitratos (TAO et al., 2006) que

seriam lixiviados às camadas mais profundas, com menor disponibilidade total de N, resultando assim perfilhos menos desenvolvidos e com poucas possibilidades de concorrer, o que haveria acelerado sua mortandade. Estes perfilhos também poderiam ser prejudicados pela absorção de nitratos em estádios iniciais (LIN et al., 2005).

Figura 84 – Evolução dos colmos desde emergência (E), início do perfilhamento (IP), perfilhamento ativo (PA), R2 e R6 da escala de Counce et al. (2000) e colheita nas safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina. Em cada estágio da safra 2011-12 foi feita a média com N colmos dos manejos com inundação e das doses T1 e T2 da safra 2012-13. A média dos colmos em IP na safra 2012-13 foi estimada em função da densidade de emergência das plântulas. A linha negra contínua indica a projeção das panículas obtidas na colheita na safra 2011-12 e a linha negra de pontos na safra 2012-13

A importância que adquiriram os colmos após do estágio vegetativo na safra 2012-13 refletiu-se na correlação positiva e significativa de PG-Nºcolmos m^{-2} (R2). Uma hipótese semelhante haveria ocorrido com o manejo AS no solo PlaNa, que após de alcançar o máximo Nºcolmos na etapa vegetativa, teve a maior mortandade em estádios seguintes.

O estágio R2 caracteriza-se porque a panícula está no interior da bainha da folha bandeira, computado como parte da BB+C, porquanto esta componente teve correlação positiva e altamente significativa em ambas as safras.

Não houve correlação significativa PG- Nºcolmos m^{-2} (R6) em ambas as safras, o que resultou não previsto. Para a safra 2011-12, a razão provável seria a forte mortandade de colmos em AS e na safra seguinte a alta uniformidade de

colmos obtida em R6, porquanto pequenas variações em mais ou menos da quantidade de colmos não necessariamente têm a mesma variação da PG.

Além do anterior, é necessária a discussão sobre o N°colmos máximos possíveis de obter com variedades índicas semi-anãs e semeadura em seco. Supondo que na colheita seja desejável obter 500 Pan m⁻², com uma distância entre fileiras de 0,2 m, resultariam 100 Pan m⁻² por fileira, ou seja, uma panícula por cada cm de espaçamento, quase a grossura do colmo. Isto implica que as folhas dos colmos expandam-se através da fileira, no entre sulco, cobrindo todo o espaço. Haveria então um limite máximo de panículas por fileira e, segundo o espaçamento da semeadura, por m². De acordo ao anterior, conseguir esse limite de perfilhos já na etapa de diferenciação da panícula seria ótimo para evitar grandes quantidades de perfilhos inférteis e assim aumentar a EUN total e dos grãos. Isto põe em dúvida a afirmação que alto perfilhamento é garantia de maior produtividade, suportado pela correlação negativa (safra 2011-12) entre PG e N°colmos m⁻² durante o estágio MP.

5.4.5 Produtividade e seus componentes

O resultado final da cultura é refletido na produtividade, porém, isto é consequência do desenvolvimento durante todo ciclo, tal como foi apresentado nos tópicos anteriores. Em termos gerais a produtividade de ambas as safras foram semelhantes, ainda com três diferenças a destacar: a) entre AS e os manejos com inundação (safra 2011-12), b) entre T0 e as doses com adubação de N (safra 2012-13), c) entre diferentes doses de adubação de N (T1 e T2) e d) entre AS e In (safra 2012-13). As razões destas diferenças não são as mesmas, e cada uma tem uma justificativa diferente.

a) A diferença de PG entre AS e os manejos com inundação foi devido ao menor número de panículas, principal componente da produtividade, e também menor NEt e FE. Em todas estas impactos a razão foi a deficiência hídrica. A menor FE em AS deveu-se ao estresse hídrico ocorrido prévio à floração e início de enchimento dos grãos, sendo este aspecto já discutido no tópico de Aspersão. Yoshida (1981) refere que o estresse hídrico severo entre 3 a 11 dias prévios a floração pode provocar até o 60% de esterilidade. Em AS a porcentagem de esterilidade foi de 16% indicando o impacto que teve na FE. A menor quantidade de NEt em AS indicaria também um incipiente estresse hídrico no final de perfilhamento

e início da etapa reprodutiva (BOUMAN E TUONG, 2001), devido ao número de espiguetas define-se neste estágio (Fageria, 2007). A deficiência hídrica em MP também teve impacto no IAF, como já foi analisado, portanto as plantas têm diferentes respostas fisiológicas antes do estresse. Crusciol et al. (2003) também determinaram redução do NEt com estresse hídrico entre R1 e R2.

b) As mesmas variáveis que provocaram a diferença em AS na safra 2011-12 foram as que impactaram na testemunha, isto é, menor N°Pan m⁻² e massa das panículas (menor NEt), somente que agora a razão foi a deficiência de N. Inesperadamente, FE foi maior em T0 que no resto das doses, com menor espiguetas inférteis, ainda que a percentagem geral fosse muito baixo (média de 5,3% nos tratamentos DA) sem afetar a produtividade. O impacto do N sob os colmos já foi analisado no tópico de perfilhamento. O menor NEt dever-se-ia à insuficiência de N no estágio de iniciação da panícula, momento crítico no qual se definem a quantidade de espiguetas totais da panícula (DOBERMANN e FAIRHURST, 2007; FAGERIA, 2007). Embora seja significativamente menor, a componente BP em T0 teve um desempenho satisfatório, porquanto o solo teria um aporte de N, P e K considerável. Porém, não há evidência que sem adubação essa situação fora a perdurar e, provavelmente, após de vários ciclos de arroz contínuo sem adubação, as produtividades decaíam consideravelmente.

c) As diferenças de PG entre T2 e T1 (média de 712 kg ha⁻¹), ainda quando BP não foram estatisticamente diferentes, seria devido a T2 ter maior NEt e FE (esta última com apenas 0,44%), o que permitiu superar a DMS de PG (670 kg ha⁻¹) já que N°Pan foram quase iguais. Os incrementos nas doses de N permitem incrementos semelhantes de produtividade, corroborando o suposto da relação linear PG-AbNT (WITT et al., 1999; DOBERMANN e FAIRHURST, 2000).

d) Ao contrário da safra 2011-12, a diferença entre AS e In na safra 2012-13 não foram devidas a deficiência hídrica, já que a irrigação com os aspersores foi muito precisa. A explicação seria pela relação fonte-destino, já que na etapa final de enchimento dos grãos (R6 a R8), a biomassa das lâminas em AS foi maior que em In, ainda que sem significância estatística. A outra componente importante no deslocamento de assimilados seria BB+C, que se bem foi menor a In, superou a Ic. Na colheita, a BP_a em AS superou ao resto, porquanto, em conjunto com o anterior, deduz-se que no manejo AS houve adequada quantidade de assimilados para deslocar sendo então o problema o destino. A explicação estaria na FE, que se bem

em todos os tratamentos foram muito elevadas ($> 90\%$) e maiores que na safra anterior, no manejo AS foi significativamente diferente ($p < 0,05$) a Ic e In. Junto com isto, leves diferenças em M1000 e N°Pan m^{-2} , ainda que não significativas, resultaram numa diferença de PG entre AS e In de 782 kg ha^{-1} , no entanto o valor da DMS foi de 670 kg ha^{-1} , que resultou baixo devido ao também baixo CV (7,1). O NEt para todos os manejos da água resultaram semelhantes, indicando adequada provisão da água e nutrientes no início do estágio reprodutivo.

A maior esterilidade de espiguetas não seria devido às condições não saturadas do solo, já que o desenvolvimento de arroz ANA nestas condições foi amplamente avaliada por Tao et al. (2006), encontrando que com manejo leS a principal componente que diminui a produtividade é a quantidade de colmos férteis (N°Pan), no entanto a FE manteve-se estável com diferentes tratamentos de solo não saturado. Além disto, In também teve condições de solo não saturado, no entanto Ic teve quase a mesma produtividade que In, só que as diferenças com AS foram menores e não alcançaram a ser estatisticamente significativas.

A repetição nas duas safras do aumento da esterilidade com AS, ainda que com valores muito pequenos, indicaria possíveis impactos da gota dos aspersores nos grãos de pólen, aspecto já discutido no tópico de Aspersão.

Com tudo, a esterilidade de espiguetas foi a menor a 15% referido por Yoshida (1981) para variedades ANA semi-anãs. Este mesmo autor refere que a maior N°Pan m^{-2} aumenta a esterilidade das espiguetas, ou diminui FE, devido a problemas para completar o enchimento. Isto foi corroborado na safra 2011-12 com a correlação negativa altamente significativa entre N°Pan m^{-2} e %E. Ao contrário, na safra 2012-13 ambas relações não foram significativas. Uma provável razão seria o baixo %E desta safra. Na safra 2012-13 houve correlação positiva significativa entre NEt e N°Pan m^{-2} , no entanto na safra anterior também foi positiva, ainda que não significativa. Isto contrasta com os resultados de Fageria (2007), quem refere que existe uma relação inversa entre o tamanho da panícula (NEt) e a quantidade de panículas per unidade de área (N°Pan m^{-2}) devido ao grande número de panículas o destino também seria importante e haveria limitações na fonte. Segundo este suposto, em ambas as safras não houve problemas de fonte para encher adequadamente os grãos. Uma provável razão da diferença dos resultados obtidos em San Javier seria que a variedade Puitá INTA tem panículas pequenas em relação

às variedades de arroz AE avaliadas por Fageria (2007), com 150-200 espiguetas per panícula.

A M1000 foi muito estável em ambas as safras. A razão disso é que o tamanho da espiguetas é fortemente controlado pelo tamanho da casca, devido à genética de cada cultivar antes que às condições ambientais ou de manejo (YOSHIDA, 1981). Na safra 2012-13 houve uma leve tendência a menor massa no manejo AS, ainda que não fosse devido à fonte, senão a destino. Quintero (2009) determinou uma média de 23,4 g para o mesmo cultivar em Entre Ríos, muito semelhantes a San Javier. A massa dos grãos da variedade Puitá INTA CL corresponde-se aos cultivares índicos, longos e finos, ainda que outras variedades ANA tenham maior M1000, até 28 g (QUINTERO, 2009) e variedades AE, também grão longo fino, de até 30 g (CRUSCIOL et al, 2006). Embora seja estável, a massa dos grãos teve resposta à irrigação na região dos Cerrados (Brasil), com veranico ou deficiência hídrica durante a floração e enchimento dos grãos, aumentando até 18%. Weber et al. (2003) determinaram médias de 26,1 g para IRGA 417 irrigado, com muito baixa variação (CV de 3,5%). Além disso, a menor duração do período de enchimento dos grãos da variedade Puitá INTA CL em San Javier, em relação à Entre Ríos e Sul do Brasil, não influenciou na massa dos grãos, confirmando a estabilidade desta componente. Também corrobora isto a falta de correlação entre PG-M1000 em ambas as safras.

A igualdade no IC (0,44) nos manejos da água (safra 2012-13) indicaria que a diminuição da produtividade em AS (manejo que teve diferenças significativas respeito à inundação) foi acompanhada com a mesma proporção de diminuição da BAT, sendo a deficiência hídrica responsável disso. Em Entre Ríos, Quintero (2009) refere valores médios de IC de 0,52 para o Puitá INTA CL, maiores aos obtidos em San Javier. Na safra seguinte os valores resultaram um pouco mais altos (em torno a 0,45), resultando o manejo AS com o menor valor e com diferenças estatísticas em relação à In. Isto dever-se-ia a problemas no destino, devido às lâminas (fonte) haveriam produzido suficiente quantidade de assimilados para deslocar diretamente ao destino, mas as panículas não conseguiram acumula-los. Na testemunha ocorreu o contrário, a relação destino/fonte seria maior e por isso o IC foi maior, com diferenças significativas respeito a T1 e T2. A razão estaria no menor componente NEt, isto é, menor nº de espiguetas na floração, que foram enchidas sem problemas pela fonte de carboidratos de lâminas e órgãos vegetativos e por isso foi alta

também a FE. As ótimas condições de temperatura e radiação durante o enchimento dos grãos na safra 2012-13 foram fundamentais para conseguir aquilo.

Os resultados obtidos nos experimentos foram muito diferentes às produtividades médias da Região, que para a safra 2011-12 foi de 6 Mg ha⁻¹, com tendência a declinar. Essa diferença é superior à estimada por Quintero (2009) para trabalhos experimentais na Região de Entre Ríos, Argentina. As possíveis razões seriam que as aplicações de adubo, o controle das ervas daninhas e a colheita foram feitas manualmente, sem as perdas próprias das máquinas, além que o manejo da água foi certo e por isso as parcelas receberam maior atenção.

5.5 Nutrição nitrogenada

5.5.1 Interação manejos da água-adubação N-mineralização da MO

Nas safras 2011-12 e 2012-13 foram determinadas duas situações relacionadas com os manejos da água, a adubação parcelada e as doses de aplicação de N:

- I. Não houve diferença significativa na produtividade, suas principais componentes, absorção de N e indicadores de eficiência entre AT e AP. Em consequência, também não houve interação MOA x manejos da irrigação.
- II. Não houve interação significativa entre DA x manejos da água nem na produtividade, suas principais componentes, absorção de N e indicadores de eficiência.

A seguir será abordada cada uma destas condições.

Situação I

Para explicar a falta de diferença entre MOA, é provável que a uréia aplicada em cobertura e prévio à inundação, fosse hidrolisada e convertida a amônio entre 10 a 15 dias após (WANG et al., 2011) e ficasse disponível para sua absorção pela cultura e também imobilizada pelos micro-organismos do solo (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003), o que evitaria sua perda. Em AT isso haveria ocorrido em maior proporção, só que ao momento da diferenciação da panícula, quando foi completada a adubação em AP, 40 a 50% do N já haveria sido absorvido. Explica esse razoamento o fato que não houve diferenças estatísticas no N^ocolmos em MP. Por outro lado, considerando a BAT neste estágio na safra 2011-12 (média de 3 Mg ha⁻¹)

e uma CN média de $1,5 \pm 0,2\%$ (FAGERIA, 2004), a quantidade de N absorvido seria em torno a $45 \pm 6 \text{ kg N ha}^{-1}$. No entanto, o aporte da adubação foi de $78,2 \text{ kgN ha}^{-1}$ em AT e 46 kgN ha^{-1} em AP, porém, o 30% do N haveria sido imobilizado pelos micro-organismos (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003), resultando finalmente $54,7$ e 32 kgN ha^{-1} para AT e AP respectivamente. Assim, a diferença com a AbNT em MP seria de $-9,7 \pm 6$ e $13 \pm 6 \text{ kgN ha}^{-1}$, porquanto só em AP haveria sido necessário o aporte da mineralização do solo no período vegetativo, de um total calculado de 128 kgN ha^{-1} . O N haveria sido acumulado nas lâminas inferiores, nas bainhas e colmos (YOSHIDA, 1981), e depois deslocado às novas lâminas até que elas estejam completamente expandidas (R2-R3). Isto significaria que a menor quantidade de N aplicado ao começo da irrigação, além do proveniente da mineralização, haveria sido suficiente.

Outra razão da falta de resposta às aplicações divididas do N seria a baixa eficiência da uréia aplicada em diferenciação da panícula. No manejo Ic, devido à aplicação ser feita sob a lâmina h, a recuperação aparente do N haveria sido muito baixa, com perdas entre 40 a 80% (VLEK, STUMPE e BYRNES, 1980; DOBERMANN e FAIRHURST, 2000; MÉNDEZ LARROSA e CHURRUT, 2009). No manejo In, a uréia foi aplicada em solo saturado e após inundado, porquanto, se o pH haveria sido suficientemente alto (maiores a 7,5-8) as perdas por volatilização de NH_3 seriam semelhantes aos do manejo Ic (PATRA, BURFORD e REGO, 1996) ou também, após da hidrólise, o amônio poderia difundir as capas oxidadas do solo, se nitrificar e volta a difundir as capas semi-reduzidas, para se perder por desnitrificação (REDDY, 1982). No manejo AS, a umidade do solo haveria sido suficiente para uma rápida hidrólise e, com valores de pH maiores a 7,5-8 haveria perdas por volatilização de NH_3 (PATRA, BURFORD e REGO, 1996), por emissão de N_2O pelo processo (CANTOU et al., 2012) ou também poderia haver nitrificação na capa oxidada e apos lixiviados com a solução do solo a camadas mais profundas (REDDY, 1982). A aplicação parcelada de N ocorreu no agro-ecossistema Vz, tendo o solo PlaN a valores muito baixos de PerI_r , porquanto a lixiviação não haveria ocorrido e, se houvesse, seria muito pequena. O mesmo ocorre na Ásia em sistemas de arroz ANA devido aos trabalhos de enlodado de solo (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000).

Para que ocorram as perdas por volatilização de NH_3 , o pH do solo deve ser maior a 7,5-8 (PATRA, BURFORD e REGO, 1996), no entanto as camadas 0-0,11m e 0,11-0,25 m do PlaNa tiveram pH de 6,1 e 7,2 respectivamente. Quanto às perdas de N_2O , medições realizadas por Noborio et al. (2012) indicam picos de emissão após das adubações com uréia. Estes autores também referem que manejos de um dia de inundação seguido de dois dias de drenagem apresentam menores emissões de N_2O que um dia de inundação seguido de quatro dias de drenagem, tendo este último emissões equivalentes a Ic. Determinações de emissões de N_2O em arroz ANA com manejo Ic e In no Uruguai tiveram conclusões similares (CANTOU et al., 2012).

Por outro lado, o N aportado pela mineralização da MO no solo PlaNa (safra 2011-12) haveria sido importante, ainda que não fosse avaliada testemunha sem adubação. Corrobora isto a relação CO/Nt deste solo, que foi quase igual à RegAb nas camadas superficial e sub-superficial e que a mineralização é fortemente dependente da relação CO/Nt (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003), além que as condições de umidade e temperatura do solo em ambas as safras foram semelhantes. O tipo de mineralização seria contrastante segundo os manejos. Com inundação haveria predomínio de NH_4^+ -N, cuja mineralização seria mais lenta (REDDY, 1982; DOBERMAN e FAIRHURST, 2000), sendo disponível após de máximo perfilhamento (REDDY, 1982), em coincidência com a 2ª aplicação de N no tratamento AP, entretanto em AS haveria predomínio de NO_3 -N desde o início, segundo já foi analisada. Compensando as perdas de N por volatilização de NH_3 , desnitrificação ou percolação de nitratos, em condições de solo não saturado a mineralização da MO seria mais acelerada (REDDY, 1982) e, segundo este autor, em estádios iniciais o arroz utiliza N da adubação e nos estádios avançados o N da mineralização devido as condições mais prolongadas da mineralização anaeróbia. Por isto, o manejo AS haveria tido maior disponibilidade que os outros, produto da adubação mais da mineralização. Isto se corroboraria com a componente $\text{N}^\circ\text{colmos m}^{-2}$ no estágio MP da safra 2011-12, onde AS foi significativamente maior aos outros manejos, sendo que o perfilhamento tem alta resposta ao N (FAGERIA, 2007).

Não houve evidência que ambas as formas de mineralização aportaram diferentes quantidades de N segundo os manejos. Considerando a CN, nos grãos foi estatisticamente maior em AS, embora a AbNG fosse menor devido à menor BG, em tanto na palha foi semelhante em todos os manejos.

Ainda que na safra 2011-12 não houve diferenças entre AT e AP de N, o tratamento AT-AS teve os menores valores de BAT, BPa, PG, N°Pan m⁻² e NEt, em concordância com os resultados obtidos por Wescott e Vines (1986), que determinaram que, com aspersão, a adubação parcelada de N permite atenuar as perdas de produtividade. Provavelmente as perdas de N não hajam sido suficientemente importantes como para gerar diferenças estatísticas no tratamento AT-AS, embora conjugasse com a deficiência hídrica para assim diminuir as componentes mais importantes da produtividade.

No estágio R2 da safra 2011-12 houve diferenças significativas na BAT entre o manejo In e Ic, explicada pela maior mortandade de colmos em In. Uma provável razão disto seria a menor absorção de N nos colmos na etapa vegetativa devido à menor disponibilidade de N após da adubação. Supondo pH e temperaturas semelhantes, a hidrólise da uréia também haveria sido semelhante porque ambos os manejos foram inundados ao mesmo tempo (PATRA, BURFORD e REGO, 1996; NORMAN, WILSON e SLATON, 2003; MÉNDEZ LARROSA e CHURRUT, 2009). O amônio está presente na camada reduzida e, segundo o gradiente de concentração, difunde às capas oxidadas (REDDY, 1982). Esta poderia haver sido mais grossa na interfase solo-atmosfera no manejo In, por não ter uma altura h permanente, permitindo maior nitrificação do amônio. O nitrato difunde com muita rapidez à camada reduzida situada imediatamente abaixo da capa oxidada, em resposta a um gradiente de concentração vertical descente, devido ao coeficiente de difusão ser seis vezes maior que o amônio (REDDY, 1982). Segundo este autor, o fluxo de nitrato é controlado por sua concentração, além da altura da lâmina h e a grossura da capa oxidada. Decorrente com isto, no manejo In haveria maior concentração de nitratos na camada oxidada e maior fluxo à camada reduzida, possibilitando maiores perdas por desnitrificação do N. Esta conceptualização é importante para conhecer as possíveis limitantes deste manejo, e para decidir sob a quantidade de adubo a aplicar.

Apesar de algumas diferenças ao longo do ciclo devidas às formas de adubação e processos de mineralização da MO, os resultados finais da produtividade e seus componente não tiveram diferenças significativas entre os manejos In e Ic nem entre AP e AT no agro-ecossistema Vz.

Situação II

Esta situação ocorreu no agro-ecossistema Tç, com solo RegAb. Considerando que a capa oxidada estivesse localizada na interfase solo-atmosfera no manejo AS ou na interfase solo/lâmina h para os manejos In e Ic, a influência da lâmina h não seria importante devido que não foi permanente, já que 10-12 horas após de inundar o solo ficava em capacidade de campo, a diferença do solo PlanNa em que In sempre manteve o solo saturado. Supondo iguais pH e temperaturas do solo ao momento da adubação, prévio a inundaço, a hidrlise da uria haveria sido semelhante porque as condies de umidade foram adequadas em todos os manejos da gua (PATRA, BURFORD e REGO, 1996), fornecendo similares quantidades de amnio. Este ction est disponvel para a absoro pelas razes ou difundir para a capa oxidada e se nitrificar. Se esta capa foi semelhante em todos os manejos, a quantidade de NO₃-N seria equivalente. Aps disso, pde haver absoro, devido ao arroz absorve tanto nitrato quanto amnio (YOSHIDA, 1981), difuso capa semi-reduzida localizada imediatamente abaixo da capa oxidada e os nitratos poderiam ser desnitrificados. O manejo Ic seria o que mais possibilidades teve de apresentar uma capa semi-reduzida, mais devido as altas taxas de Perlr deste manejo, tambm seria provvel percolao a camadas mais profundas, incluso alcanar o lenol fretico. O manejo AS no teria -ou seria menor- capa reduzida ou semi-reduzida, embora a alternncia umedecimento-secagem aumentaria as perdas por volatilizao de NH₃ (PATRA, BURFORD e REGO, 1996) ou tambm perdas de N₂O (CANTOU et al., 2012). O manejo In teria situaes intermdias, com presencia de capa semi-reduzida para desnitrificar os nitratos, Perlr como para lixiviar a camadas mais profundas e alternncia secagem-umedecimento para promover perdas NH₃ e N₂O. O NO₃ percolado a camadas mais profundas poderia haver sido absorvido pelas razes, devido estas haver extrado gua da camada 0,20 m, como fora verificado como os tensimetros colocados nessa profundidade. Avaliaes especficas sob grossura das capas, forma de N no solo e percolao de NO₃ seriam importantes em futuras pesquisas.

Da mesma forma, a mineralizao da MO (mdia de 77% da absoro total de N) neste solo indicaria que no houve restries para este processo e haveria sido similar entre os manejos da gua, devido interao no significativa e semelhana na AbNT em todos estes. Devido s condies de saturao/aerao, provavelmente predominara amnio no manejo Ic, ainda tambm com presencia de NO₃,   inversa no manejo AS, com situaes intermedirias em In.

Belder et al. (2004) também não encontraram interação para crescimento da biomassa e componentes da produtividade entre doses de N-manejos da água em arroz ANA, embora com solos semelhantes à PlaNa. Estes autores concluem que, ainda com manejos de água que não saturam o solo, se as irrigações permitem manter altos conteúdos de água, próximos a saturação, não haveria perdas por desnitrificação ou percolação profunda.

A modo de síntese, pesquisas em solos argilosos de Louisiana (EEUU) determinaram um balanço de N para todo um ciclo de arroz a campo, com variedades ANA e inundação contínua. Os aportes por adubação e solo foram entre 100-170 kgN ha⁻¹ e as perdas por nitrificação-desnitrificação, volatilização e percolação de 102, 5 e <1 kgN ha⁻¹ respectivamente (REDDY, 1982). As baixas perdas por volatilização foram atribuídas à uréia foi aplicada no interior do solo. A recuperação do adubo foi estimada em 49% (49 kgN ha⁻¹), sendo 30 kgN ha⁻¹ imobilizado biologicamente e o resto (19 kgN ha⁻¹), perdido por desnitrificação-denitrificação. Neste trabalho a absorção de N pela cultura foi 93 kgN ha⁻¹ e, considerando que 44 kgN ha⁻¹ foram aportados por o solo, grande proporção das perdas por nitrificação-desnitrificação seriam fornecidas pela mineralização da MO ocorrida em condições de anaerobiose, isto é, NH₄⁺-N (REDDY, 1982). Estes resultados contrastam com os obtidos por Patra, Burford e Rego (1996), com aplicação de uréia em superfície, em solos argilosos com pH maiores a 7,7 onde, em condições de umedecimento-secagem e 7 dias após da aplicação da uréia, as perdas por volatilização foram em torno a 40%, reduzindo-se a 30% em condições de umidade a capacidade de campo, com secagem rápido da superfície do solo. Dobermann e Fairhurst (2000) referem que as perdas por volatilização e desnitrificação frequentemente excedem o 50% do N aplicado, sendo as primeiras as principais quando o N é aplicado a lanço. Estes autores também mencionam perdas N₂O-N em condições de umedecimento-secagem. Além dos adubos, outras fontes de entradas de N são a fixação biológica do N₂ atmosférico, os sedimentos da água de irrigação e a poeira presente na PP. Dobermann e Fairhurst (2000) referem que a fixação biológica é baixa quando o solo tem altos teores de N, no entanto avaliações em arroz ANA com Ic indicaram que as algas localizada na capa aeróbica do solo (0,05 m) foram responsáveis de aportar 10 kgN ha⁻¹ no ciclo da cultura (REDDY, 1982). Este autor refere 2 kgN ha⁻¹ como aporte das PP, e entre 2-5 kgN ha⁻¹ segundo Dobermann e Fairhurst (2000). Igual magnitude para o aporte de

sedimentos pela água de irrigação foi reportada por estes últimos autores. Não foram avaliados estes ingressos de N nesta Tese e também não há referências de rangos de valores para San Javier ou Argentina.

5.5.2 Absorção de N

A CN em grãos e palha em ambas as safras foi semelhante aos resultados obtidos em outras pesquisas com alta produção de arroz ANA. Quintero (2009) reporta valores médios ($n=177$) para grãos e palha de 0,92 e 0,50%, com máximos de 1,28 e 0,86% respectivamente, para variedades de arroz ANA cultivadas em Entre Ríos, Argentina. Na Ásia, também para variedades de arroz ANA cultivada em seis países, os valores médios ($n=712$) de CN em grãos e palha foram 1,16 e 0,71%, com máximos de 2,16 e 1,21% e mínimos de 0,65 e 0,31% respectivamente (WITT et al., 1999). Os resultados de CN em grãos da safra 2012-13 aproximaram-se aos valores médios de Entre Ríos, no entanto na safra 2011-12 estiveram próximos à média determinada na Ásia ou ao máximo determinado no Entre Ríos.

Uma diferença importante entre ambas as safras foi que na primeira houve maior CN em grãos que em 2012-13, embora a CN em palha fosse o contrário. Comparando os manejos com inundação da safra 2011-12 com T2 da safra 2012-13, que teve doses de adubação com N semelhantes, a AbNT da primeira resultou menor. Porém, analisando a AbNG com os mesmos tratamentos, a safra 2011-12 teve magnitudes algo maiores, ainda que sem tanta diferença. O anterior significaria que as plantas de arroz absorveram maior quantidade de N na safra 2012-13, ainda que, em proporção, os grãos absorveram quantidades menores, ficando na palha a maior proporção do N absorvido. Estes resultados indicariam, de modo geral, que na safra 2011-12 houve maior deslocamento de N desde os órgãos vegetativos aos grãos. Isto se corrobora com o maior ICN que teve os manejos Ic e In da safra 2011-12 em relação a T2 (tratamento de referência ainda que não tivesse o maior valor de ICN). O ICN é um indicador muito utilizado em medições da partição de assimilados e para inferir a eficiência com que a cultura de arroz utilizou o N absorvido na produção de grão (FAGERIA e BALIGAR, 2005). Segundo estes autores, altos valores de ICN indicam maior eficiência na utilização do N, determinando variações entre 0,53 e 0,64 para cinco cultivares de arroz ANA no Brasil, sendo a variabilidade genética a responsável dessas variações. Na Ásia, a média de ICN ($n=703$) foi 0,59,

e 0,65 no quartil superior (WITT et al., 1999). Devido à ICN não inclui o N absorvido pelas raízes (FAGERIA, 2007), os valores anteriores podem ser comparados com os obtidos nesta Tese. Na safra 2011-12, ICN esteve em torno a 0,64 e já na seguinte entre 0,49-0,57. Nesta safra a dose T2 foi a que menor valor apresentou, sendo os manejos da água muito estável, em torno a 0,54. Menores valores de ICN indicariam menores produtividades (FAGERIA, 2007), embora isto não ocorresse em San Javier, devido a T2 obter o maior valor de PG. Outro exemplo que também não corrobora o anterior foi o manejo AS da safra 2011-12, que teve alto ICN (0,63), maior que T2 e semelhante aos manejos com inundação dessa safra, embora a produtividade fosse 17% menor.

As especulações referidas à menor eficiência e deslocamento do N na safra 2012-13, não tiveram implicações na produtividade, já que atingiu os maiores valores de PG. Porém, permite explicar a habilidade do arroz para absorver N em etapas fenológicas tardias, o que também incide em estratégias de adubação.

A evolução dos colmos no período vegetativo tem alta correlação com a disponibilidade de N no solo (FAGERIA, 2007). Na safra 2011-12 o perfilhamento foi muito alto em todos os manejos da água, indicando boas condições de nutrientes e também de água. Já em 2012-13, a quantidade de N absorvido no período vegetativo haveria sido acorde com o perfilhamento alcançado em cada uma das doses de adubação aplicada e também na testemunha (média de 7 colmos pl^{-1}). A partir do início do período reprodutivo, a taxa de mortandade dos colmos nesta safra foi igual de elevada para todos os tratamentos (média 38%), sendo uma provável razão disso a escassez de N nos colmos jovens (terciários), que não teriam habilidade para concorrer com os colmos mais desenvolvidos (colmos principais e secundários). Na safra 2011-12 a mortandade de colmos foi muito mais gradual, indicando que, sem restrições hídricas e com adequados teores de N, os perfilhos teriam maior capacidade de supervivência. Fageria e Baligar (2001) também determinaram gradualidade na mortandade de colmos segundo doses de N.

A principal diferença entre ambas as safras foi a biomassa aérea no período reprodutivo (R2 e R6), principalmente lâminas e colmos, como já foi analisado com IAF e Perfilhamento. Porém, na colheita, a BAT e BP foram semelhantes entre os tratamentos, inclusive T2 (safra 2012-13) superou aos tratamentos Ic e In (safra 2011-12). Também foi analisado em tópicos anteriores o grande crescimento da BAT em 2012-13, entre R6 e maturidade fisiológica, no entanto na safra anterior houve

principalmente deslocamento aos grãos desde os órgãos vegetativos. Isto seria concordante com os resultados de CN-grãos e palha-, AbNT e AbNG. Para atingir altas taxas de crescimento no período de enchimento dos grãos, a deficiência, ou uma menor proporção de N nas folhas que ainda ficam verdes, reduziria a fotossíntese e diminuiria a produção de carboidratos, elemento maioritário nos grãos de arroz (87%, YOSHIDA, 1981). Isto indicaria que as folhas, que foram autênticas “fábricas” de assimilados, deveu haver absorvido N para manter verde por mais tempo as lâminas e assim alcançar altas produtividades (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000, SAMEJIMA et al., 2004).

O razoamento do parágrafo anterior foi de modo geral para todos os tratamentos, ainda que a absorção não fosse igual na testemunha devido a BFV foi menor que T1 e T2 (Tabela 32), limitando a fonte. A menor AbNG de T0 em relação a T1 y T2 explicar-se-ia pela menor quantidade de panículas, sendo que as lâminas individuais haveriam tido a mesma influência em todos os tratamentos, suposição válida devido à CN nos grãos foi semelhante em todos eles (Tabela 35). A hipótese da grande influência das lâminas verdes no enchimento dos grãos se verifica a partir da CN na palha. Em T2 foi significativamente maior que T1 e T0 e isto representou maior AbNT, já que AbNG não teve diferenças com T1. Porém, esta maior CN na palha não significou deslocamento aos grãos e haveria sido alcançada em estádios anteriores a maturidade fisiológica. Evidência disso foi que T2 teve maior BAT no estágio R2 em relação aos demais tratamentos (Figura 65) e, a igualdade de CN nesse estágio, teria maior absorção de N. A semelhança de AbNG entre T1 e T2 se verificaria então pela similitude de BFV entre ambos os tratamentos e cobra sentido a hipótese quanto a que em R6, a BFV permitiu acumular a maior parte do N nos grãos através da interação lâminas-raízes (SAMEJIMA et al., 2004).

Em síntese, até R6 o tratamento T2 haveria acumulado maior quantidade de N em bainhas e colmos que em T1 em resposta à maior dose de N aplicado. No período de enchimento dos grãos, ambos os tratamentos haveriam utilizado similares quantidades de carboidratos e N acumulados para a respiração das raízes, panículas e demais órgãos, mas ficando em T2 maior CN na palha. Isto explicaria o valor tão baixo de ICN do tratamento T2.

Com a mesma hipótese pode ser explicada a não diferença nem CN da palha nem AbNP_a entre T0 e T1 (Tabela 35). Devido à menor BFV da testemunha em R6, e, por conseguinte menor fotossíntese (FAGERIA, 2007), haveria limitação da fonte,

menor interação com as raízes e as plantas requereriam menos carboidratos para atender sua respiração de manutenção (YOSHIDA, 1981), além de limitações no destino pela menor quantidade de espiguetas a encher (NEt) na testemunha, porquanto o N acumulado até R6 seria muito pouco deslocado aos grãos. No entanto, no estágio R6, o tratamento T1 haveria tido maior absorção em bainhas e colmo que T0 devido à dose de N aplicado, sem limitação do destino já que o NEt foi alto e também elevada a fotossíntese, embora sem possibilidade de ser completamente fornecido pelas raízes. Assim, em T1 haveria maior proporção de N deslocado desde BB+C e, na colheita, a palha ficou com a mesma CN que T0. Confirma o suposto de maior deslocamento em T1 o fato que AbNP_a foi semelhante a T0, ainda que com significativamente maior quantidade de panículas. Do anterior resulta que o ICN foi igual entre T0 e T1.

Na safra 2011-12 haveria ocorrido deslocamento de N desde órgãos vegetativos (BB+C e BFV) à panícula no período de enchimento dos grãos, em concordância com o 41% de perda de biomassa destes componentes, confirmando os resultados de CN em grãos e palha.

A semelhança tanto de CN (grãos e palha) quanto AbNG e AbNT entre os manejos da água na safra 2012-13 indica condições semelhantes antes e após do enchimento dos grãos e dever-se-ia a estes não terem influência na disponibilidade de N no solo. Ou seja, as perdas ocorridas com a adubação e a mineralização da MO foram equivalente para todos os manejos.

Na safra 2011-12 foi testada a adubação parcelada com N, ainda que com a mesma dose, recomendada por diversos autores devido à habilidade do arroz de absorver N até diferenciação da panícula (YOSHIDA, 1981; FAGERIA, 2007). Solos com baixa capacidade de armazenamento de N ou baixa CTC seriam adequados para aplicações parceladas (YOSHIDA, 1981), além que também solos com alta infiltração e alta condutividade hidráulica com possíveis perdas de N por percolação. Stone e Silva (1998) também sugerem aplicações parceladas de N, embora para variedades de arroz AE cultivadas em sequeiro nos Cerrados, Brasil. Em Ásia constitui uma prática muito habitual para aumentar indicadores como RAN e EAN (DOBERMANN e FAIRHURST, 2000). Porém, no solo PlaNa a adubação parcelada não teve efeitos na absorção do N nem palha nem grãos refletido isso na evolução da biomassa aérea, que também não teve diferenças estatísticas devido ao parcelamento da adubação. Quintero et al. (2009, PROARROZ) realizaram

pesquisas em quatro sítios de Entre Ríos, com iguais doses de adubação de N (70 kgN ha^{-1}), aplicadas prévio a inundação e na diferenciação da panícula. Também não encontraram diferenças significativas de AbNT na colheita em três dos sítios, com mínimas de 75 e máximas de 170 kg N ha^{-1} .

Na safra 2012-13 a EAbN foi muito alta em todos os tratamentos e refletia a capacidade do arroz de absorver quantidades variáveis de N segundo sua disponibilidade no solo (WITT et al., 1999, RUSELL et al., 2006, FAGERIA, 2007), sendo provável que ao início da cultura o N fosse provisto pela adubação e já no período reprodutivo haja utilizado o N nativo (NORMAN, WILSON e SLATON, 2003, LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL, 2008). É importante mencionar que nesta safra foi validada a eq. (1) para obter N_{nat} , sendo certos os resultados, além que só foi considerada a absorção da biomassa aérea, sem raízes, porquanto as incluindo seria possível que a EAbN fosse ainda maior. Na safra 2011-12 a EAbN foi menor para todos os manejos da água e adubação, embora a disponibilidade total de N foi semelhante a T2 e maior que T1 da safra 2012-13. Isto indicaria menor aproveitamento do N, tanto o aplicado com a adubação quanto o mineralizado pelo solo. A menor AbNT na colheita não necessariamente significou que não houvesse maior absorção em estádios anteriores, particularmente em R6, e devido à mortandade de colmos entre R6 e maturidade fisiológica hajam perdido parte do N acumulado. No entanto as lâminas tiveram fotossíntese, os colmos continuariam absorvendo N, só que uma proporção deles não alcançou a colheita. Assim, parte do N absorvido haveria ficado nos colmos mortos, não contabilizados em AbNT. Humphreys et al. (2006) referem que demasiado N absorvido nos estádios iniciais pode conduzir a perdas na produtividade por acamamento ou esterilidade de espiguetas. O acamamento não ocorreu em nenhuma das safras, ainda que a mortandade de colmos pudesse ser considerada uma perda equivalente, no entanto a segunda razão de perda explicaria a menor FE dos tratamentos T2 e T1 em relação à testemunha na safra 2012-13. É importante esclarecer que o aporte de N_{nat} estimado segundo eq. (1) não foi validada nesta safra, porquanto poderia também ser fonte de erro.

Os resultados de EIN estiveram em concordância com a hipótese já mencionada, devido ao tratamento T2 foi estatisticamente menor que T0 e T1, indicando que aquele haveria tido maior absorção de N na planta antes do período de enchimento, mas não foi deslocado aos grãos, resultando em menores

eficiências. No mesmo sentido, T0 haveria tido menor acumulação de N na planta que T1 antes do enchimento, embora que por menor destino, não houve deslocamento importante e todo o N acumulado ficou na palha, igualando EIN com T1 (Tabela 36). A alta EIN da testemunha indicaria um bom desempenho da mineralização da matéria orgânica do solo, porém, para obter resultados ao longo prazo, a adubação mineral ou orgânica é fundamental (WITT et al., 1999; RUSELL et al., 2006; QUINTERO, 2009).

A utilização do RIN como indicador da quantidade de N necessária para produzir uma tonelada de arroz casca deve ser cuidadosamente analisada, devido à relação AbNT (abscissa) e PG (ordenada) somente é linear entre um determinado rango de absorção de N (WITT et al., 1999; DOBERMAN e FAIRHURST, 2000), porquanto altas produtividades não necessariamente requerem alta absorção do N, no entanto os demais macronutrientes (P ou K) não sejam limitantes. Por isso, para comparar os resultados com outras regiões, as produtividades e IC devem aproximar-se aos obtidas neste experimento, isto é, IC superiores a 0,4 e produtividades entre 8 a 10 Mg ha⁻¹. A modo de exemplo, Witt et al. (1999) referem valor médio (n=703) de RIN de 17,1 kgN MgPG⁻¹ na Ásia, no entanto Quintero (2009), 13 kgN MgPG⁻¹ para 166 casos em Entre Ríos, Argentina. Para a recomendação das quantidades de N requeridas pela cultura de arroz, a EUNT pareceria ser o indicador mais apropriado porque engloba a disponibilidade total de N no solo.

O RAN é outro indicador importante, sendo o valor médio obtido na safra 2012-13 semelhante a 70% referido por Dobermann e Fairhurst (2000). Quintero et al. (2009-Proarroz) determinaram uma ampla variação da RAN para Entre Ríos, Argentina, com valores entre 17 a 70%. Larrosa e Churrut (2009) referem, para cultivares ANA no Uruguai, valores de RAN de 62% com aplicações de uréia em solo drenado e inundação no dia seguinte, também semelhantes a San Javier. Por outra parte, Quintero (2009) refere valores de EAN entre 14,6 e 34,7 kg BG kgN⁻¹ para Entre Ríos, Argentina, rango de valores similares aos obtidos em San Javier.

Para estimativa da quantidade de adubação requerida em lotes agrícolas semelhantes às condições apresentadas nos agro-ecossistemas Vz e Tç de San Javier, poderia se utilizar as eq. (65) e eq.(66) a partir da estimativa de N_{nat} com eq.(2) e os valores de BAT, EUNT e RAN obtidos nesta Tese:

$$RLN = \frac{BAT}{EUNT} - N_{nat} \quad (65)$$

$$RBN = \frac{RLN}{RAN} \times 100 \quad (66)$$

em que:

RLN – Requerimentos líquidos de N, expressa em kgN ha⁻¹.

RBN – Requerimentos brutos de N, expressa em kgN (adubo) ha⁻¹.

BAT deve estar em kg ha⁻¹ na eq.

A fundamentação de não utilizar EIN ou RIN seria que com estes indicadores também deve ser utilizado o IC, o que agrega um fator mais de incerteza (PILATTI M., comunicação pessoal).

5.5.3 Aporte do N nativo

Segundo os resultados da AbNT na testemunha (safra 2012-13) deduz-se que a estimativa de N_{nat} foi acertada, já que ainda dever-se-ia computar a quantidade de N absorvido pelas raízes. Este valor seria entre 10-14 kgN ha⁻¹ de absorção adicional, considerando que a biomassa das raízes representa 10% da BAT na maturidade fisiológica com CN semelhante à palha (YOSHIDA, 1981).

A proporção de N_{nat} na safra 2012-13 coincide com os resultados de Wang et al. (2011), que referem aportes de N entre 62 a 80% pela mineralização da matéria orgânica em solos da China, embora com diferentes taxas de adubação e manejos da água. Na região de Entre Ríos, Argentina, os aportes de N_{nat} variam entre 60 a 80% para níveis de adubação normais (70 kg N ha⁻¹) numa grande variedade de solos, no entanto diminuem até 40% quando são triplicadas as doses de N (QUINTERO et al., 2009). Méndez Larrosa e Churrut (2009) determinaram que o 68% do N absorvido em variedades de arroz ANA cultivadas em Uruguai, foi fornecido pela mineralização no solo, no entanto Reddy (1982) reporta valores em torno de 60%, sendo a amônio a principal fonte de N em solo franco-siltoso e com inundação contínua.

A estimativa de N_{nat} com a eq. (1) no solo RegAb resultou apropriada devido a considerar tanto o pH quanto θ_s e θ_{cc} , teores que tiveram todos os manejos da água. O valor de NO₃ utilizado foi muito baixo (7 mg kg⁻¹) e seria aproveitado na etapa inicial, após da emergência e antes do início da irrigação. Após disso, se o manejo fosse inundação e gera-se a capa reduzida imediatamente abaixo da capa

oxidada, haveria rápida difusão e por conseguinte perdas por desnitrificação. Porém, há divergência entre autores respeito à quantidade real de N que aporta o solo. Segundo Quintero e Figueroa (2008) seria mais útil uma análise que permitisse estimar o N que se mineraliza na cultura em condições anaeróbicas. Reddy (1982) determinou que a mineralização do $\text{NH}_4^+\text{-N}$ em condições anaeróbicas resultou muito bom indicador da disponibilidade de N durante o ciclo da cultura. Esse autor refere uma taxa de mineralização de $0,575 \text{ kg NH}_4^+\text{-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ em solo franco-siltoso, que representou 3,4% do nitrogênio orgânico total (Nt). Os aportes de N_{nat} em San Javier representaram valores menores em relação a Nt, 1,9 e 2,3% para as safras 2011-12 e 2012-13 respectivamente.

Os processos de mineralização do N são discutidos no tópico interação-manejos da água-adubação com N-mineralização da MO.

5.5.4 CN no ciclo

Visando estimar a evolução do N no ciclo da cultura, e assim corroborar o suposto de deslocamento dos órgãos vegetativos ou absorção pelas raízes, primeiramente se analisará o marco conceitual e seguidamente apresentarão diferentes metodologias de cálculo.

A concentração do N nas plantas varia com o ciclo da cultura, seguindo uma curva exponencial negativa eq. (67) (GREENWOOD et al., 1990; LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL, 2008):

$$\text{CN} = a_c \text{BAT}^{-b} \quad (67)$$

em que:

CN – Concentração do N na planta (%);

BAT – Biomassa aérea total, expressa em Mg ha^{-1} ;

a_c e b' parâmetros empíricos da curva potencial

A eq. (67) é válida para $\text{BAT} \geq 1 \text{ Mg ha}^{-1}$ (SHEEHY et al., 1998)

O arroz ao início de seu ciclo apresenta as maiores concentrações, com valores em torno a 4% em V4, 1,72% no começo do estado reprodutivo e finalizando em torno de 0,82% para variedades ANA cultivada no Entre Ríos, Argentina (QUINTERO 2009). Dobermann e Fairhurst (2000) referem valores ótimos iniciais

entre 2,9 a 4,2% e finais na palha entre 0,6 a 0,8%. A absorção do N é proporcional à biomassa e a concentração na planta, porquanto acompanha a evolução da BAT (YOSHIDA, 1981; FAGERIA, 2007). Porém, uma parte também significativa pode ser absorvida no período de enchimento dos grãos, se as raízes se mantiverem ativas (SAMEJIMA et al., 2004).

A diminuição da CN na planta, em concordância com o crescimento do dossel, deve-se a dois processos (LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL, 2008): a) diminuição da área foliar específica (AFE), devido às plantas destinam maior proporção de sua biomassa aos tecidos denominados estruturais, com baixa concentração de N, que permitem o crescimento em altura e assim captar maior irradiância, e b) diminuição da CN por unidade de área foliar das folhas sombreadas, concentrando maior N nas folhas que captam maior luminosidade e pelo tanto mais ativas na fotossíntese. Essas folhas, ainda que a CN na planta diminua, mantem-se verdes e com concentração de N constante (GASTAL e LEMAIRES, 2002).

Por outro lado, há proporcionalidade entre a absorção do N e o índice de área foliar (IAF), variável para diferentes espécies, ou variedades de uma mesma espécie, em função do AFE. Isto é, a expansão foliar não é a única via para armazenar o N, senão também o engrossamento das folhas, das bainhas ou do colmo (LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL, 2008). Essa proporcionalidade não é linear, como pode ser deduzida a partir da eq.(1). Em efeito, multiplicando ambos os lados da equação pela BAT, resulta a eq. (68):

$$\frac{BAT \times CN}{100} = AbNT = a'BAT^{1-b} \quad (68)$$

em que a' representa a quantidade teórica mínima de absorção do N ($kg\ ha^{-1}$) a partir da qual haveria crescimento da biomassa. Matematicamente representa a origem da reta se fosse aplicada a função logarítmica.

Se a curva de evolução da BAT fosse sigmóide e a absorção do N fosse potencial, no momento em que a taxa de crescimento é nula alcançaria-se a máxima absorção do N, continuando após com o processo de remobilização às panículas. Na safra 2012-13 isso não ocorreu, sendo máxima até maturidade fisiológica (R8). Considerando de interesse avaliar particularmente a safra 2012-13, foram representados os valores de CN em planta estimados com eq. (67), utilizando valores de 5,2 e 0,52 para os coeficientes a_c e b (LEMAIRE, JEUFFROY e GASTAL,

2008) e a CN real a partir da ponderação das CN em grãos e palha (Figura 85). Os valores médios de CN planta estimado e real foram 1,12 e 0,84% respectivamente. As diferenças entre ambos os valores é ampla, de 34%, o que significaria que alguns dos coeficientes utilizados sobre dimensiona a CN em planta para a variedade Puitá INTA CL. Quintero (2009) refere que a CN estimada com eq. (67) e iguais coeficientes, também foi superior aos valores reais para diferentes variedades ANA cultivadas em Entre Ríos, Argentina. É para destacar o amplo rango da BAT do experimento no qual a CN foi estável (Figura 85).

Segundo as produtividades e os valores de EIN e RIN obtidos nos tratamentos com adubação (safra 2012-13), a absorção de N no final do ciclo não seria limitante. Devido a não ter avaliada experimentalmente a curva de evolução da CN, para sua estimação foi utilizada a eq. (67) com os coeficientes já mencionados e os conjuntos de dados da BAT dos tratamentos com adubação (T1 e T2) nos estádios avaliados. A representação gráfica (Figura 86) mostra entrecruzamento de valores de CN em diferentes estádios fenológicos, indicando só variabilidade entre parcelas, devido a individualmente elas tiveram crescimento da BAT desde R2 até R8.

Figura 85 - Relação da concentração de N na planta (CNplanta) e a biomassa aérea total (BAT) na colheita de arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

Figura 86 - Relação da concentração de N na planta (CNplanta) e a biomassa aérea total (BAT) para diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), safra 2012-13, San Javier, Argentina

Por outro lado, para a estimativa da AbNT ao largo do ciclo, foi ajustado o coeficiente a' da eq. (68) com os dados de AbNT obtidos na colheita, minimizando o quadrado do erro e mantendo o valor do coeficiente b (0,52). O valor ajustado de a' foi $39,5 \text{ kg ha}^{-1}$ e, segundo a curva obtida, entre R6-R8 as raízes haveriam absorvido N com a finalidade de manter verde as lâminas (Figura 87).

Figura 87 - Relação da absorção de N na planta (AbNT) e a biomassa aérea total (BAT) para diferentes estádios ontogênicos, mediados de perfilhamento (MeP), R2, R6 e R8 da escala de Counce et al. (2000), safra 2012-13, San Javier, Argentina

Outra metodologia para avaliar a relação entre a absorção de N e a produtividade foi proposta por Witt et al. (1999). Estes autores representaram as componente PG (ordenada) e a AbNT (abscissa) de um grande conjunto de dados (em torno a 2.200), excluindo aqueles valores de PG com IC menores a 0,4. A relação entre ambas as componentes representa a EIN, de modo que podem ser obtidas diferentes retas a partir de selecionar percentiles da EIN. Assim, os percentiles menores indicam a máxima acumulação e os maiores a máxima diluição de N (WITT et al., 1999). Os dados próximos à máxima diluição indicariam que o fornecimento do N limita a produtividade, devido à alta eficiência, no entanto se fossem próximos à máxima acumulação o N estaria fornecido em ótimas quantidades e outros fatores estariam limitando a produtividade (QUINTERO, 2009). Foram selecionados os percentiles 2,5 e 97,5%, resultando EIN de 48 e 75 kgBG kgN⁻¹ respectivamente. Com os mesmos percentiles, Witt et al. (1999) referem valores mais amplos, 42 e 96 kgBG kgN⁻¹ respectivamente. Foram agrupados os tratamentos T1-T2 da safra 2012-13 e Ic-In da safra 2011-12 (Figura 88), encontrando-se a maioria dos dados na zona intermédia, indicando que maiores doses de adubação com N não necessariamente terem resposta na produtividade, sendo outros os fatores limitantes. No caso do manejo AS (2011-12) a água foi a limitante. Os dados de T0 deveriam estar próximos à máxima diluição, embora isso não ocorresse (Figura 88), devido aos valores tão elevados da EIN. Porém, neste solo houve resposta ao N, porquanto prevalente as amostras obtidas sejam insuficientes para concluir em relação à resposta da cultura ao N, além que deveram se incluir outros cultivares em futuras pesquisas.

Figura 88 – Relações entre produtividade dos grãos (PG) e absorção total de N na biomassa aérea considerando em conjunto os tratamentos T1-T2, e a testemunhada (safra 2012-13) e os manejos lc-ln e AS (safra 2011-12), San Javier, Argentina. As curvas superiores (máxima diluição de N) correspondem aos valores referidos por Witt et al. (1999), dil 2,5% Witt e aos obtidos em San Javier, dil 2,5% SJ. As curvas inferiores (máxima acumulação de N) correspondem aos valores referidos por Witt et al. (1999), acum 2,5% Witt e aos obtidos em San Javier, acum 2,5% SJ

Finalmente, tentando estimar a proporção de N absorvido e deslocado entre R6 e R8 em ambas as safras, foi elaborada uma metodologia para estimar a absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos (ADNEG) cujo procedimento e passos são descritos a continuação:

- 1) Apresentar a CN dos grãos em R8 (%).
- 2) Apresentar a AbNG (kg N ha⁻¹).
- 3) Apresentar o incremento da BP entre os estádios R6 e R8 (IncrBP R6-R8), total o como taxa diária (kg ha⁻¹ ou kg ha⁻¹dia⁻¹).
- 4) Calcular a acumulação de N entre R6 e R8 (AcumNP R6-R8, kgN ha⁻¹) segundo eq. (69)

$$\text{AcumNP(R6 - R8)} = \frac{\text{CNgrão}}{100} \times \text{IncrBP(R6 - R8)} \quad (69)$$

- 5) Apresentar BP em R6 (kg ha⁻¹).
- 6) Estimar a CNpanícula (%) em R6 considerando que neste estágio tivesse uma concentração de N 10% menor aos grãos.

- 7) Calcular a AbNpanícula (kgN ha⁻¹) em R6 como o produto da BP x CNpanícula (10⁻²).
- 8) Estimar AbNG_{est} (kgN ha⁻¹) como a soma de AcumNP R6-R8 mais AbNpanícula,
- 9) Calcular o erro estándar (Es, %), segundo eq.(70):

$$Es = \frac{(AbNG_{est} - AbNG)}{AbNG} \times 100 \quad (70)$$

Erro menor à 1% é aceitável, sendo a variável de ajuste a CNpanícula em R6.

- 10) Apresentar CN da palha (%).
- 11) Apresentar AbNP_a (kgN ha⁻¹).
- 12) Apresentar a variação da BP_a entre os estádios R6 e R8 (IncrBP_a R6-R8), total o como taxa diária (kg ha⁻¹ ou kg ha⁻¹dia⁻¹).
- 13) Calcular a variação de N em lâminas e colmos entre R6 e R8 (VarNC+L R6-R8, kgN ha⁻¹) segundo eq. (69). A variação pode ser (+), o que significa um incremento da biomassa de lâminas e colmos, ou (-), isto é, houve diminuição. Ambas as situações ocorreram nos experimentos.
- 14) Apresentar a BFV e BB+C no estádio R6 (kg ha⁻¹).
- 15) Estimar a CN (%) das lâminas e colmos no estádio R6. Dobermann e Fairhurst (2000) propõem valores ótimos da folha bandeira de 2%. Devido a BFV inclui, além da folha bandeira, outras três lâminas, esse valor seria menor, em torno de 1,5%. No entanto a CN da BB+C foi considerada 10% maior que a CN na palha.
- 16) Calcular a AbN das lâminas e colmos (kgN ha⁻¹) em R6 como o produto da BFV ou BB+C x CN das lâminas e os colmos (10⁻²).
- 17) Estimar AbNP_{aest} (kg N ha⁻¹) como a suma da VarNC+L R6-R8 mais AbN das lâminas e colmos.
- 18) Se entre R6 e R8 houve incremento da biomassa das lâminas e colmos, o cálculo de AbNP_{aest} será maior, porquanto a resta com AbNP_a seria o possível N deslocado aos grãos (N_{des}). Ao contrário, se houve diminuição, pode se calcular o erro padrão (Es, %), segundo eq.(70). Neste caso, a CN das lâminas foi considerada como a variável de ajuste.

- 19) A estimativa do N absorvido entre R6 e R8 resulta da resta entre AcumNP R6-R8 (Passo 4) e Ndes (kgN ha^{-1}) ou $\text{kgN ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$ dividindo pelo período entre R6 e R8. Este último valor representa a taxa de absorção do N no período de enchimento dos grãos.
- 20) Finalmente obtém-se o N deslocado desde bainhas, colmos e lâminas. Este valor pode ser a variável Ndes se houve diminuição da biomassa aérea entre R6-R8 ou VarNC+L R6-R8, no caso contrário, de aumento da biomassa aérea nesse período.

Na Tabela 53 (ANEXO) são apresentados os resultados da safra 2011-12, na qual se pode observar claramente redistribuição de N de lâminas e colmo aos grãos (Passo 13). A CN panícula em R6 (Passo 6) foi coerente com os resultados de CN nos grãos, no entanto a CN das lâminas em R6 (Passo 15) que foi a variável de ajuste, resultou muito menor a 1,5% proposto originalmente, ainda que maior à CN da palha na colheita. Isto indicaria menor atividade da fotossíntese e menor interação com as raízes (SAMEJIMA et al., 2004), ainda que houvesse absorção de N (Passo 19) nos manejos Ic e In, não assim em AS. As taxas de absorção (Passo 19) foram relativamente altas e estiveram em concordância com os resultados de Quintero et al. (2009, PROARROZ). A proporção de N absorvido neste período haveria sido aproximadamente 19% da AbNT, no entanto a estimativa de N deslocado desde bainhas, colmos e lâminas (passo 20) foi equivalente ao valor de VarNC+L R6-R8 (passo 13), resultando maiores proporções no manejo AS (38%) que nos manejos com inundação (média de 18%).

Na safra 2012-13 ocorreu o contrário já que houve acumulação de N em lâminas e colmo (Passo 13) a partir do crescimento da biomassa destas componentes entre R6 e R8. A CN das lâminas foi de 1,5% (Tabela 54, ANEXO), permitindo se manter verdes por mais tempo, e sendo a responsável da produção de assimilados durante a fotossíntese, os quais foram diretamente deslocados aos grãos. Provavelmente a folha bandeira seja a que mais assimilados deslocou (DOBERMANN E FAIRHURST, 2000), porém, a CN dos grãos na colheita foi, em geral, menor que a safra 2011-12, indicando que esta adaptação da planta tem suas limitações.

A $\text{AbNP}_{\text{aest}}$ (Passo 17) foi maior que AbNP_a, porquanto foi estimado o possível deslocamento entre R6 e R8 (Passo 18). A maior atividade das lâminas permitiu aumentar as taxas de absorção de N no período de enchimento dos grãos

até 50% no manejo In (Passo 19, Tabela 52). A proporção de N absorvido neste período em relação a AbNT haveria sido semelhante em T0 e T1 (20%) e maior em T2 (28%). Nesta safra, o N deslocado desde bainhas, colmos e lâminas (passo 20) foi equivalente a Ndes (passo 18), resultando a proporção em relação a AbNT apenas de 6%.

A metodologia ADNEG permitiu corroborar o rol das lâminas no período de enchimento dos grãos, em particular na safra 2012-13 na qual teve a maior CN para assim manter a fotossíntese. Também foi verificada a interação da parte aérea com as raízes com a finalidade de absorver N no estágio final de crescimento, relação que teve muita importância na safra 2012-13. Em particular deve ser destacado que a CN na palha (colheita) em T2 foi significativamente maior a T0 e T1, porquanto, segundo estes resultados, a variedade de arroz avaliada absorveria N desde o solo ainda tenha possibilidade de ser deslocado desde bainha, lâminas e colmo. Para sua validação, serão necessárias pesquisas que determinem a CN em lâminas, colmos e panícula no estágio R6, além da colheita.

5.6 Indicadores de eficiência da água, da irrigação e pegada hídrica

Segundo a definição clássica, para todos os métodos e sistemas de irrigação, a EFa representa a lâmina armazenada no perfil do solo e disponível pela cultura, em relação à água aplicada na parcela (GRASSI, 1987; TARJUELO, 2005; BERNARDO, SOARES e MANTOVANI, 2006).

Para uma melhor compreensão da EFa, deve se analisar as componentes da L_{il} segundo os diferentes manejos da água eq. (9) e eq. (10). Nos manejos com inundação, em ambas as safras, Per_{lr} foi a principal componente da perda da água, maior ainda no solo RegAb, no entanto em AS a principal perda foi por deriva e evaporação na safra 2011-12 e devida a Per_{lr} na seguinte. A EFa poderia se haver diferenciado entre Ic e In se a Lib houvesse sido diferente, mas PP não foi importante durante o período da irrigação. A componente D_{ss} da eq. (9) foi desprezível devido às taipas estarem compactadas e os carregadores com água. Porém, como já foram analisado, alguns autores consideram estas perdas em conjunto com Per_{lr}

A componente D_s não foi considerada na EFa devido ao suposto que durante a irrigação não deveria haver escoamento superficial já que os tabuleiros são

fechados e sem escoamento ao pé. Isto só ocorre em condições controladas, mas em campo de produtores, e sem estruturas hidráulicas apropriadas, é muito comum observar em San Javier altas perdas por escoamento superficial no manejo Ic quando são utilizadas taipas a nível com aplicação da água num único ponto e com avanço águas abaixo encadeado, próprio do agro-ecossistema Vz. Estas perdas não são aproveitadas nas parcelas dos tabuleiros águas abaixo e geralmente são conduzidas pelas valetas de drenagem até o final da fazenda. Em alguns casos, podem ser reutilizadas mediante bombeamento. O manejo In permitiria diminuir estas perdas em tanto o avanço da água seria mais controlado ou também com sistematização do solo com níveis uniformes (irrigation system level). Além do anterior, e também para condições de campo, tanto Ic como In têm a vantagem que o avanço da água é feito sob uma lâmina (Ic) o sob solo saturado (In), o que evita maiores perdas por Perlr. Porém, é provável que seus valores sejam ainda maiores que os obtidos no experimento, devido aos tabuleiros ser mais longos (compridos), resultando finalmente com EFa menores.

A bibliografia refere valores de EFa para inundação entre 0,55-0,65 para tabuleiros com arroz e solos de textura franca (GRASSI, 1987) e de 0,7 para sistemas estacionários de aspersão (TARJUELO, 2005). Estes valores de referência foram algo menores em inundação embora maiores em aspersão na safra 2011-12. Já na safra seguinte, os manejos de inundação foram fortemente influidos por Perlr e resultaram a metade dos valores de referência, no entanto AS tampouco atingiu 0,7, também devido as perdas por Perlr.

Em síntese, a EFa nos manejos com inundação no solo PlaNa foi adequada e, no solo RegAb, Ic não seria recomendável pelas baixa magnitude da EFa, no entanto em In poderia se aumentar se diminuir a dose aplicada de 40 para 30 mm. Isto significaria que a água armazenada atinga menor espessura da camada e dever-se-ia controlar que o Ψ_m não baixe de -10 kPa. Em AS e para o solo RegAb, a EFa poderia aumentarse diminuindo a percolação, aumentado para isso o intervalo entre aplicações, avaliando também que o Ψ_m não baixe de -10 kPa. Novas pesquisas poderiam ser desenvolvidas no solo RegAb para diminuir a percolação e avaliar rangos de perda da produtividade segundo tensões e profundidade de controle.

A utilização do indicador ETa permite evidenciar como foi o aproveitamento integral da água disponível pela cultura, especialmente para os manejos In e AS. Na

safras 2011-12 as precipitações pluviais não foram importantes, embora seu aproveitamento constitua a justificativa principal do emprego do manejo In em climas úmidos.

O indicador EUa definido nesta Tese segue a linha conceitual de culturas em sequeiro, nas quais, a partir do balanço hídrico ou métodos indiretos, determina-se o consumo de água (ETc) e, com a produtividade, obtêm-se EUa (HSIAO, STEDUTO e FERERES, 2007), no entanto Pa considera os aportes de água na cultura (PP+Lib). O primeiro avalia aquelas espécies ou variedades da mesma espécie mais eficientes no uso da água numa certa região e o segundo serve para avaliar a eficiência do manejo da água pelos agricultores.

A utilização do indicador Paz permite comparar tanto diferentes regiões produtoras de arroz quanto manejos da água devido a maior ou menor utilização da água azul (irrigação). Seus valores sempre superaram a Pa, com pouco porcentagem quando as chuvas têm pouca participação (Tabela 39) o muito por cima quando a participação das precipitações pluviais são importantes (Tabela 40). Segue a mesma tendência que Pa, e para alterar isso dever-se-ia utilizar-se diferentes lâminas de irrigação, do mesmo modo que nos experimentos com irrigação deficitária.

Os valores de EUa de ambas as safras foram semelhantes, indicando uma tendência de esta variedade na região de San Javier. Ao contrário, quando intervêm a irrigação e as PP, os indicadores Pa e Paz foram muito diferentes, com maiores valores nos manejos com inundação na safra 2011-12 (menor percolação do solo PlaNa) e ao contrário em AS, os maiores valores foram na safra 2012-13. Os máximos resultados de EUa, Pa e Paz de ambas as safras foram 1,5, 1,17 e 1,5 kg m⁻³ respectivamente. Bouman et al. (2005) determinaram, para arroz ANA cultivado em Ásia e irrigado com inundação, valores de EUa entre 1,5 a 2,12 kg m⁻³, semelhantes a esta tese, no entanto para Pa foram tão baixos como 0,22 até 0,68 kg m⁻³. Humpreys et al. (2006) determinaram valores de EUa, Pa e Paz, ainda que com outra denominação, de 0,8, 0,65 e 0,72 kg m⁻³ respectivamente, para New South Wales, a principal região com orizicultura na Austrália, com produtividade média de arroz em casca de 9,8 Mg ha⁻¹. Os menores valores das eficiências analisadas na Austrália devem-se à maior evapotranspiração desta região, com 1.150 mm durante o ciclo do arroz, quase o dobro de San Javier, no entanto que Pa e Paz também foram baixos pela quantidade de irrigação aplicada e quase sem

diferenças entre ambos devido a PP ser muito baixa, em torno de 150 mm (HUMPRHEYS et al., 2006). Quando a precipitação é importante durante o ciclo da cultura, como na região de Wuhuan, China, com PP de 950 mm, o indicador Paz pode ser de até $2,32 \text{ kg m}^{-3}$ (HONG et al., 2000).

A Pa determinada nesta Tese coincide com a calculada por Belder et al. (2004). Estes autores determinaram variações entre $0,5\text{-}1,48 \text{ kg m}^{-3}$ para manejos leS e lc em regiões da China e nas Filipinas, obtendo diferenças significativas a favor de leS com aplicações de 180 kgN ha^{-1} , embora sem diferenças com 90 kgN ha^{-1} . Os resultados de Pa da safra 2012-13 também indicaram diferenças entre os tratamentos T2 e T0, ainda que também entre T2 e T1.

A partir dos resultados de um experimento com variedades de arroz ANA no Sul de Brasil com manejos lc e ln (MEZZOMO, 2009), os indicadores Pa e Paz resultaram $0,67$ e $1,13 \text{ kg m}^{-3}$ para lc e $0,83$ e $1,63 \text{ kg m}^{-3}$ para ln, respectivamente. Na mesma região do Brasil, Toeschler et al. (1997) reportam valores médios de Pa (embora com outra denominação) para os manejos lc, ln e AS de: $0,59$, $0,7$ e $0,57 \text{ kg m}^{-3}$ respectivamente. A constante nestes trabalhos foi a maior Pa em ln, devido à menor lâmina de irrigação. O mesmo ocorreu na safra 2012-13, incluso os valores resultantes ($0,6$ e $0,7 \text{ kg m}^{-3}$ para lc e ln respectivamente), foram iguais aos obtidos por Toeschler et al. (1997). Quanto a AS, em ambas as safras Pa foi similar, embora as diferenças de produtividade, com média de $0,96 \text{ kg m}^{-3}$, 68% a mais do obtido por Toeschler et al. (1997). Continuando na América do Sul, pesquisas feitas no Uruguai com variedades de arroz ANA e diferentes manejos da água determinaram valores de Pa e Paz em torno a $0,82$ e $1,12 \text{ kg m}^{-3}$ (ROEL, CAPURRO e MARTÍNEZ, 2012) semelhante à safra 2012-13. O manejo que superou a média ($0,93$ e $1,41 \text{ kg m}^{-3}$ para Pa e Paz respectivamente), foi denominada por estes autores irrigação deficitária controlada, que consiste em alternar solo seco-úmido até floração e depois inundar com uma lâmina permanente. A razão das maiores produtividades foi um melhor aproveitamento das PP, sem diminuição das produtividades.

Por outro lado, Bouman et al. (2005) definem a eficiência de aplicação da água como a relação entre ETr e a soma Lib+PP, resultando valores entre $0,28$ a $0,45$ para as condições de arroz com inundao cultivado em sia. A definio de ETa desta Tese seria semelhante de Bouman et al. (2005), s que na Li_L fica retida uma quantidade de gua no consumida pela cultura ao final do ciclo. Por isso, os valores de ETa da safra 2011-12 ($0,58$) seriam algo menores se s fosse

considerada a ETr. Em outras palavras, o indicador ETa castiga menos aos manejos Ic ou In que requerem manter saturado o solo durante a irrigação.

A EUa do arroz resultou menor do que do milho, 2 kg m^{-3} (MARANO, 2000), maior do que da soja, $0,7 \text{ kg m}^{-3}$ (MARANO et al. 2006) e semelhante a do trigo, $1,4 \text{ kg m}^{-3}$ (MARANO et al., 2012), todos eles determinados na região central de Santa Fe, com latitudes semelhante a San Javier e com irrigação suplementar.

Da comparativa dos resultados experimentais em San Javier com outras regiões surge que a campo seria possível atingir ótimos resultados com diferentes manejos da água adaptados aos agro-ecossistemas existentes.

A pegada hídrica de uma cultura permite conhecer a quantidade de água evapotranspirada para produzir uma tonelada de biomassa, tanto de grãos (cereais), ou matéria seca (CHAPAGAIN e ORR, 2009). Está intimamente relacionada com a água virtual, conceito introduzido por Allan (1998), que representa a inversa da EUa. A ideia associada com a água virtual tenta conscientizar à sociedade da quantidade de água requerida para produzir um determinado produto e, a nível regional, a PH permite quantificar a magnitude de água utilizada para a produção global desse produto. A segmentação em verde, azul e cinza é importante aos efeitos de deslindar as proporções que participam as diferentes fontes da água. No caso da água azul, ela concorre com outros usos e pode levar a conflitos entre usuários da água, por isso é importante determinar indicadores, além das eficiências de irrigação e uso da água, que permitam aperfeiçoar a irrigação.

No caso de arroz, as perdas por percolação representam alta proporção da Lib, segundo foi apresentado em tópicos anteriores. Chapagain e Hoekstra (2011) afirmam que as perdas por percolação, tanto originadas na irrigação como nas precipitações, não devem integrar a estimativa da PH a efeitos de comparar com outros produtos agropecuários. No caso da safra 2011-12, PerP correspondeu à etapa final do ciclo, quando terminou a irrigação, e também inclui perdas por drenagem sub-superficial (Dss). É evidente que as maiores perdas ocorreram no agro-ecossistema Tç, considerando os manejos com inundação. Chapagain e Hoekstra (2011) determinaram PerIr para os 13 principais países produtores de arroz, com valores entre 1.200 a $4.120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Segundo o anterior, Vz teria valores de PerIr razoáveis, no entanto Tç supera amplamente estes valores, porquanto se deduz a necessidade de utilizar outros manejos da água.

Por outro lado, a soma das magnitudes das componentes Per_{lr} e Per_P supera amplamente a AU_{cz} (Tabela 4.10.1), porquanto seriam suficiente para permitir a diluição do N percolado.

Santa Fe participa com o 19,3 e 14,2% da superfície colhida e da produção de arroz em casca de Argentina, respectivamente. Chapagain e Hoekstra (2011) realizaram estudos da PH da produção nacional de arroz durante o período 2000-2004, estimando valores de PH_{Av} , PH_{Aaz} , PH_{Acz} e PH_{Ac} para Argentina de 539, 498, 93 e $1.130 \text{ Mm}^3 \text{ ano}^{-1}$ respectivamente. Embora esse ano representasse a menor superfície colhida da década (153.400 ha contra 222.700 ha na safra 2012-13), as proporções de água verde (47%), azul (44%) e cinza (8%) que esses autores determinaram para Argentina são semelhantes às obtidas para Santa Fe (Figura 69). Proporções semelhantes de água verde e azul também foram determinadas para os países asiáticos, principais produtores de arroz (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011), e a razão disso é que o arroz em Argentina é produzido na estação úmida, de modo semelhante com o período de monção nos países de Ásia.

As possibilidades de aumento de uso da água verde (não concorrente com outros usos da água) e pelo tanto menor uso da água azul, em Argentina em geral, e no Santa Fe em particular, seria possível incorporando o manejo In para aproveitar melhor as precipitações (FILIPPI et al., 20013). Quanto ao volume da percolação total na produção de arroz na Argentina, ele foi estimado em $1.270 \text{ Mm}^3 \text{ ano}^{-1}$ (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011), no entanto considerando o valor de Per_{lr} obtido para Santa Fe (Tabela 42), representa apenas 10,5% de Argentina, porquanto poderia considerar-se ótimo já que significa a metade de sua proporção na superfície colhida. Isto é devido a que agro-ecossistema $Tç$, com muita percolação, tem baixa participação na superfície colhida em San Javier (Tabela 42).

6 CONCLUSÕES

- Em San Javier, Argentina, as condições de radiação e temperaturas foram ótimas para obter altas produtividades de variedades anaeróbicas de arroz.
- A granulometria e a classificação textural de um solo não são suficientes para caracterizar a percolação, componente fundamental do balanço hídrico. O Planossolo nátrico apresenta 47% de areia na camada superficial e textura franco-argilo-arenosa; porém, a P_{eIr} deste solo foi 2,8 mm d⁻¹, no entanto o Regossolo abrupto tem 25% de areia, textura franco-siltosa e percolação dez vezes maior. O lençol freático próximo à superfície e a proximidade de rios são fatores fundamentais.
- No Planossolo nátrico, o solo saturado durante todo o ciclo foi suficiente para se desenvolver sem restrições variedades anaeróbicas de arroz. O manejo intermitente satisfaz esse requisito sem diminuir a produtividade; no entanto, com o método de aspersão as plantas tiveram importante deficiência hídrica devido às baixas taxa de infiltração e condutividade hidráulica.
- Essa deficiência hídrica ocorreu durante todo o período reprodutivo. Os sintomas foram: atraso entre 6-8 dias na floração, menor biomassa de lâminas e área foliar, menor alongamento dos entrenós, maior senescência das lâminas, maior mortandade de colmos, menor quantidade e maior esterilidade de espiguetas. Todas estas variáveis refletiram na produtividade, sendo a diminuição das panículas a de maior impacto.
- No Regossolo abrupto, o mesmo cultivar de arroz anaeróbico teve alta produtividade com solo não saturado, uma vez que o Ψ_m na camada 0-0,10 m fosse mantido em torno a -10 kPa. Neste solo, o método de aspersão resultou o mais apropriado por obter alta produtividade e economia de água (54% em relação à I_c) porque permitiu infiltrar água até uma camada de 0,2-0,3 m, no entanto o manejo intermitente, com aplicações em dias alternados, também permitiu alta produtividade e economia de água (21% em relação à I_c). A inundação tradicional teve altas perdas de água, não sendo recomendável neste solo.
- No Planossolo nátrico, os manejos com inundação tiveram maior eficiência de aplicação da irrigação que a aspersão devido às baixas perdas por percolação e alta deriva pelos ventos, no entanto no Regossolo abrupto este aspecto foi atenuado e, a partir da menor percolação, a aspersão teve as maiores eficiências.

- O manejo intermitente apresentou-se como o mais versátil em ambos solos. Sua utilização é promissória, sendo elaborada uma proposta metodológica para sua adoção pelos orizicultores.
- No Planossolo nátrico houve alta densidade de plantas na emergência, o que resultou em uma quantidade excessiva de perfilhos que foram morrendo gradualmente até a colheita, utilizando recursos de luz, água e nutrientes sem benefício para a cultura.
- O crescimento da biomassa aérea total do cultivar Puitá INTA CL foi sigmóide ou linear. Quando a disponibilidade de água e N são ótimas, predominou o primeiro e, com ótima disponibilidade de água, embora fornecimento gradual de N predominou o linear, indicando alta plasticidade do cultivar.
- Durante o período de enchimento dos grãos, no comportamento sigmóide predominaria o deslocamento dos carboidratos acumulados em lâminas, bainhas e colmo em etapas anteriores à floração. No comportamento linear predominaria a produção de assimilados nas lâminas, que permaneceriam ativas até maturidade fisiológica e com estreita inter-relação com as raízes, sendo fundamental neste período a radiação global e o fornecimento do N.
- Para a variedade Puitá INTA CL foram necessários 160 kgN ha^{-1} para produzir 10 Mg ha^{-1} de arroz em casca com adequado índice de colheita do N e, para incrementar mais 1 Mg ha^{-1} requereram-se 30 kgN ha^{-1} adicionais; porém, com diminuição do índice de colheita do N.
- A mineralização da matéria orgânica do solo aportou entre 67 a 80% do N total absorvido, sendo o restante aportado pela adubação química.
- Não houve diferença significativa na produtividade entre adubação tradicional e parcelada no Planossolo nátrico, e tampouco houve interação entre doses de adubação e manejos da água no Regossolo abrupto.
- Foi elaborada uma metodologia para estimar a absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos. Como resultado, as taxas de absorção foram $2,2 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ quando predominou o deslocamento de assimilados (curva sigmóide) e até $3,9 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ com predomínio de crescimento linear.
- A eficiência de uso da água foi semelhante em ambas safras, em torno de $1,41 \text{ kg m}^{-3}$, similar aos obtidos em outras regiões com alta produtividade de arroz em casca. Ao contrário, a produtividade da água e da água azul foram muito variáveis, dependendo da percolação do solo.

- A pegada hídrica da produção de arroz em casca em Santa Fe teve proporções de água azul e verde semelhantes aos países asiáticos, devido a que o arroz é produzido na estação úmida, de modo semelhante com o período do monção na aqueles países.
- Para alcançar em torno a 10 Mg ha^{-1} de arroz em casca em Santa Fe, Argentina, com variedades indicas semi-anãs de arroz irrigado de terras baixas, a quantidade de panículas na colheita dever-se-ia 500 Pan m^{-2} , o que significa entre dois a três perfilhos por cada colmo principal, grãos totais entre 80 a 100, fertilidade de espiguetas maior a 90% e massa de mil grãos de 24 g.

7 RECOMENDAÇÕES

- A cultura do arroz irrigado por aspersão, como parte de uma rotação agrícola, requer uma detalhada avaliação econômica. Também deve ser pesquisado o impacto das gotas sob a esterilidade das espiguetas.
- A proposta do manejo intermitente feita neste trabalho deve ser verificada em condições de campo.
- A adubação parcelada do N seria mais apropriada no agro-ecossistema Terraço, aplicando na semeadura entre 15 a 20%, 50 a 55% a lanço antes do início da irrigação, e o restante 30% na diferenciação da panícula, também a lanço, mas com solo não saturado se for uréia. No manejo intermitente deve-se deixar infiltrar água até o Ψ_m de -10 kPa e em seguida aplicar a uréia.
- No agro-ecossistema Várzea seria recomendável fazer adubação base na semeadura (15 a 20%) e o restante aplicado a lanço como uréia, anterior ao início da irrigação.
- Com semeadura em seco –plantio direto ou convencional- e solo semelhante a Planossolo nátrico, a densidade recomendável na emergência seria de 130 pl m⁻², para que no estágio de máximo perfilhamento atinja entre 800-900 colmos m⁻². No Regossolo abrupto seria desejada uma densidade maior, de 150 pl m⁻², embora não superior a 180 pl m⁻².
- As produtividades de arroz em casca obtidas neste trabalho quase duplicam a média da produtividade de Santa Fe, porquanto, além do manejo da água, devem ser incorporadas práticas que permitam incrementar a fertilidade física do solo, incluindo rotação agrícola ou pecuária. A prática de bordos elevados seria uma inovação apropriada para as condições do agro-ecossistema.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **“Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Rome: FAO, 2006. 298p.

ANBUMOZHI, V.; YAMAJI, E.; TABUCHI, T. Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.37, n.3, p.241-253, Sept. 1998.

ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SA, M.E.; CRUSCIOL, C.A.C. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.6, p.871-879, 2001.

ARTACHO, P.; BONOMELLI, C.; MEZA, F. Nitrogen Application in Irrigated Rice Grown in Mediterranean Conditions: Effects on Grain Yield, Dry Matter Production, Nitrogen Uptake, and Nitrogen Use Efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.32, n.9, p.1574-1593, 2009.

ARTIGIANI, A.C.C.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; ALVAREZ R.C.F.; NASCENTE, A.S. Produtividade e qualidade industrial do arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica e adubação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.42, n.3, p.340-349, 2012.

ASOCIACIÓN CORRENTINA DE PLANTADORES DE ARROZ. Disponível em: <http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/El_arroz_estadisticas/Estadistica_del_Arroz_en_Argentina> Acesso em: 16 dez. 2013.

BEECHER, H.G.; THOMPSON, J.A.; MCCAFFERY, D.W.; MUIR, J.S. **Cropping on raised beds in southern**. Wollongbar: NSW Agfact, 1997. 2p.

BEECHER, H.G.; DUNN B.W.; THOMPSON, J.A.; HUMPHREYS, E.; MATHEWS, S.K.; TIMSINA, J. Effect of raised beds, irrigation and nitrógeno management on growth, water use and yield of rice in south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.46, n.1, p.1363-1372, July 2006.

BELDER, P.; BOUMAN B.A.M.; CABANGON, R.; GUOAN, L.; QUILANG, J.P., LI, Y.; SPIERTZ, J.H.J.; TUONG, T.P. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.65, n.3, p.193–210, Mar. 2004.

BENINTENDE, S; BENINTENDE, M.; BATTISTA, J.; SALUZZIO, M.; SÁNCHEZ C.; STERREN, M.; ARIAS, N.; OSZUST, J.; PRETTO, G.; FACCENDINI, N. . Estimación de la mineralización y fijación biológica del nitrógeno en suelos inundados para optimizar su utilización en cultivo de arroz y minimizar el daño ambiental. **Ciencia, Docencia y Tecnología**, Entre Ríos, v.1, n.1, p.1-15, 2011.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.575-580, jun. 2004.

BLAKE G.R.; HARTGE K.H. Bul density. In: KLUTE, A.; PAGE, A.L. **Methods of Soil Analysis** pt 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison: American Society Agronomy, 1986. chap.13, p.363-375.

BOONJUNG, H.; FUKAI, S. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 1. Growth during drought. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, n.1, p.37-45, Sept. 1996.

BOUMAN, B.A.M.; TUONG, T.P. Field Water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.49, n.1, p.11-30, July 2001.

BOUMAN, B.A.M.; LAMPAYAN, R.M.; TOUNG, T.P. **Water management in irrigated rice**: Coping with water scarcity. Los Baños: IRRI, 2007. 54p.

BOUMAN, B.A.M.; PENG, S.; CASTAÑEDA, A.R.; VISPERAS, R.M. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.74, n.2, p.87-105, June 2005.

BOUMAN, B.A.M.; WOPEREIS, M.C.S.; KROPFF, M.J.; TEN BERGE, H.F.M.; TUONG, T.P. Water use efficiency of flooded rice fields II. Percolation and seepage losses. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.26, n.4, p.291-304, Dec. 1994.

BOUMAN, B.A.M.; KROPFF, M.J.; TUONG, T.P.; WOPEREIS, M.C.S.; TEN BERGE, H.F.M.; VAN LAAR, H.H. **ORYZA2000**: Modelling Lowland Rice. Los Baños: IRRI, 2000. 235p.

BOUMAN, B.A.M.; XIAO GUANG B, Y.; HUA QI B, W.; ZHI MIN B, W.; JUN FANG B, Z.; BI, C. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.97, n.1, p.53-65, May 2006.

BOUMAN, B.A.M.; LIPING, F.; TUONG, T.P.; GUO AN, L.D.; HUA QI W; YUE HUA F. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach: I. Field experiments and model evaluation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.88, n.1/3, p.23-33, Mar. 2007.

CABUSLAY, G.S.; ITO, O.; ALEJAR, A.A. Physiological evaluation of responses of rice (*Oryza sativa* L.) to water deficit. **Plant Science**, Limerick, v.163, n.4, p.815-827, Oct. 2002.

CAINELLI, V.H.; ROBAINA, A.D.; CARLESSO, R.; DOTTO, C.R.D. Desempenho e uniformidade da distribuição de água de um pivô central. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.27, n.4, p.35-40, 1997.

CAMARGO, A.P. **Desenvolvimento de um controlados de irrigação para áreas experimentais**. 2012.112p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CAMUSSI, G.F.; MARANO, R.P. Respuesta del trigo al riego suplementario en la región central de Santa Fe. *Revista FAVE*, Esperanza, v.7, n.1/2, p.7-21, 2008.

CANTOU, G.; ROEL, A.; IRISARRI, P.; TARLERA, S.; FERNANDES, A. **Arroz: Resultados experimentales 2010-2011**. Concepción del Paraguay: INTA, 2012. 108p.

CARNEVALE, I; MARANO, R.P.; IMHOFF, S.; DAMIANO, F.F.; JÓBBAGY, E.G. Puede el Riego rehabilitar tierras para agricultura?. In: CONGRESO NACIONAL DEL AGUA, 30., 2011, Resistencia. **Anais...** Resistencia: INA, 2011. 1 CD-ROM.

CECILIO, O.A. **Aplicação da equação de green-ampt na modelagem da infiltração de água em latossolo vermelho-amarelo estratificado**. 2002. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

CHAPAGAIN, A.K. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. **Journal of Environmental Management**, London, v.90, n.2, p.1219-1228, 2009.

CHAPAGAIN, A.K.; HOEKSTRA, A.Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological Economics**, Amsterdam, v.70, n.4, p.749-758, Feb. 2011.

CHEBATAROFF, N. Desarrollo, fisiología y nutrición de la planta de arroz. In: ALVISIO, A; ARANGUREN, J.D.; ARINCI, R.; BERNAUDO, G.; BUSTAMENTE, A.; CHERBATAROFF, N.; FORRESTER, M.; MARTÍNEZ, P.R.; MISÓN, A.; POZZOLO, O.; RUÍZ, A.; SANINT, L.E.; TAMBURINI, J.; ZORRILLA, H. (Ed.). **Arroz**. Buenos Aires: CREA, 1998. chap. 2, p.14-19.

COB, A.M.; COVETA, O.P. Evapotranspiración del cultivo del arroz bajo riego por aspersión. **Ingeniería del Agua**, Valencia, v.13, n.1, p.59-69, 2006.

COUNCE, P.A.; TERRY, C.K.; ANDREW, J.M. A uniform, objective, and adaptive system for expressing Rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p.436-443, Mar./Apr. 2000.

CRUSCIOL, C.A; MACHADO, J.R.; ARF, O; RODRIGUES, R.A.F. Produtividade do arroz irrigado por aspersão em função do espaçamento e da densidade de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.6, p.1093-1100, 2000.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; MACHADO, J.R. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.27, n.4, p.647-657, 2003.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; ARF, O.; MATEUS, G.P. Yield of upland rice cultivars in rainfed and sprinkler-irrigated systems in the Cerrado region of Brazil. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.46, n.11, p.1515-1520, Oct. 2006.

CRUZ, R.P.; MILACH, S.C.K.; FEDERIZZI, L.C. Rice cold tolerance at the reproductive stage in a controlled environment. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.63, n.3, p.255-261, June 2006

DEPARTMENT OF AGRICULTURE SOIL CONSERVATION SERVICE. **Soil Survey Manual**. Washington: University Press of the Pacific, 1993. 437p.

DEWANDEL B.; GANDOLFI, J.M.; CONDAPPA, D.; AHMED S. An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scales. **Hydrological Processes**, Chichester, v.22, n.11, p.1700-1712, May. 2008.

DOBERMANN, A. Future intensification of irrigated rice systems. In SHEEHY, J.E; MITCHELI, P.L.; HARDY, B.(Ed.) **Redesigning Rice Photosynthesis to Increase Yield**. **International Rice Research Institute**, Amsterdam: Elsevier Science, 2000, chap. 5.3. p.229-247.

DOBERMANN, A.; FAIRHUST, T. 2000. **Rice: Nutrient disorders and nutrient management**. Los Baños: IRRI, 2000. 191p.

DOBERMANN, A. A critical assessment of the system of rice intensification (SRI). **Agricultural Systems**, Essex, v.79, n.3, p.261-281, Mar. 2004.

ECHEVERRÍA, H.E; SAINZ ROZAS, H.R. Nitrógeno. In: ECHEVERRÍA, H.E; GARCÍA, F.O (Ed.). **Fertilidad de suelo y fertilización de cultivos**. Buenos Aires: INTA, 2006. chap. 4, p.69-97.

FAGERIA, N.K. Dry Matter Yield and Nutrient Uptake by Lowland Rice at Different Growth Stages. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, n.6, p.947-958, 2004.

FAGERIA, N.K. Yield physiology of rice. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.30, n.6, p.843-879, June 2007.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Lowland rice response to nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.32, n.9/10, p.1405-1429, 2001.

FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.B.; OLIVEIRA, J.P. Nitrogen-Use efficiency in lowland rice genotypes under field conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.44, n.17, p.545-550 2013.

FALKENMARK, M. **Land and water integration and river basin management**. Roma: FAO, 1995. 85p.

FAO. **Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.2012**. Roma, 2012. 180p.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina**. Costa Rica: IICA, 1987. 420p.

FILLIPI, R.A. MARANO, R.P. **Caracterización de prácticas culturales en arroz bajo riego en el albardón costero santafesino**. Esperanza: Ed. Universidad Nacional del Litoral, 2011. 61p.

FILIPPI, R.A.; ENGLER A.; MARANO R.P. Rice Water footprint in paddy systems of Entre Ríos. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ASSESSMENT, 5, 2013, Mendoza. **Proceedings...** Mendoza: CILCA, 2013. p.80-90.

FILIPPI, R.A.; MARANO, R. P.; ARGUISAIN, G. Evaluación económica y uso de agua de dos manejos de riego para el cultivo de arroz en entre ríos. In: CONGRESO NACIONAL DEL AGUA, 24., 2013, San Juan. **Anais...** San Juan: TOMO, 2013. 1 CD-ROM.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.

Disponível em:

<<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>> Acesso em: 16 dez. 2013.

FORSYTHE, W. **Manual de laboratorio de Física de Suelos**. San José: IICA, 1975. 212p.

FRANÇA, M.G.C.; ARAÚJO, A.P.; ROSSIELLO, R.O.P.; RAMOS, F.T. Relações entre crescimento vegetativo e acúmulo de nitrogênio em duas cultivares de arroz com arquiteturas contrastantes. **Acta Botânica Brasileira**, Porto Alegre, v.22, n.1, p.43-49, 2008.

FREITAS, T.F.S.; SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A.A. Validação de escala de desenvolvimento para cultivares brasileiras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p.404-410, 2006.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.53, n.370, p.789-799, 2002.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. . In: KLUTE, A.; PAGE, A.L. **Methods of Soil Analysis**. pt 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.15, p.383-411.

GOMES, E.M.; GHEYI, H.R.; FRANÇA E SILVA, Ê.F. Melhorias nas propriedades químicas de um solo salino-sódico e rendimento de arroz, sob diferentes tratamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.355-361, 2000.

GRANT, C.D.; DEXTER, A.R. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of moulded soil during rapid wetting. **Australian Journal Of Soil Research**, Melbourne, v.28, n.3, p.361-369, 1990.

GRASSI C. **Diseño y Operación del Riego por superficie**. Caracas: CIDIAT, 1987. 415p.

GREENWOOD, D.J.; LEMAIRE, G.; GOSSE, G.; CRUZ, P.; DRAYCOTT, A.; NEETESON, J.J. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. **Annals of Botany**, London, v.66, n.4, p.425-436, 1990.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Model for Predicting Packing Density of Soils Using Particle-Size Distribution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.43, n.4, p.758-764, July 1979.

HAEFELE, S.M; WOPEREIS, M.C.S.; NDIAYE, M.K.; BARRO, S.E.; OULD, I.M. Internal nutrient efficiencies, fertilizer recovery rates and indigenous nutrient supply of irrigated lowland rice in Sahelian West Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.80, n.1, p.19-32, Jan. 2003.

HAFEEZ, M.M.; BOUMAN, B.A.M.; VAN DE GIESEN, N.; VLEK, P. Scale effects on water use and water productivity in a rice-based irrigation system (UPRIIS) in the Philippines. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.92, n.1/2, p.81-89, Aug. 2007.

HILGERT, N.I; PENSIERO, J.F.; MARINO, G; LEWIS, J.P.; D'ANGELO, C.H. Vegetation of The Saladillo area (Province of Santa Fe) in the south of the Chaco, **Interciencia**, Caracas, v.29, n.9, p.512-520, Sept. 2003.

HOEKSTRA, A.Y.; HUNG, P.Q. **Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade**. Amsterdam: Delft, 2002. 120p.

HONG, L.; LI, Y.H.; DENG, L.; CHEN, C.D.; DAWE, D.; LOEVER, R.; BARKER, R. Impact of Water-Saving Irrigation Techniques in China: Analysis of Changes in Water Allocations and Crop Production in the Zhanghe Irrigation System and District. In: IWMI ANNUAL REPORT. **International Water Management Institute**. Colombo: IWMI, 2000. 200p.

HSIAO, T.C.; STEDUTO, P.; FERERES, E. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. **Irrigation Science**, New York, v.25, n.3, p.209-231, Mar. 2007.

HUMPHREYS, E.; MEISNER, C.; GUPTA, R.K.; TIMSINA, J.; BEECHER H.G.; LU, T.Y.; SINGH, Y.; GILL, M.A.; MASIH I.; GUO, Z.J.; THOMPSON, J.A. Water Saving in Rice-Wheat Systems. **Plant Production Science**, Tokyo, v.8, n.3, p.242-258, 2005.

HUMPHREYS, E.; LEWIN L.G.; KHAN, S.; BEECHER, H.G.; LACY, J.M.; THOMPSON, J.A.; BATTEN, G.D.; BROWN A.; RUSSELL, C.A.; CHRISTEN, E.W.; DUNN, B.W. Integration of approaches to increasing water use efficiency in rice-based systems in southeast Australia. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.97, n.1, p.19-33, 2006.

INFOSTAT. **Software estatístico**. Cordoba, 2012. Disponível em: <<http://www.infostat.com.ar/index.php>>. Acesso em: 25 jan. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA. Mapa de Suelos de la Provincia de Santa Fe. Esperanza: MAG, 1981. Escalas variam.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRARIAS. **Resultados experimentales arroz 2004-05**. Tacuarembó, 2005. 72p.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA PROYECTO ARROZ. **Campaña 2007-2008**. Corrientes, 2008. 71p.

JACKSON, M.L. **Análisis químico de suelos**. 4. ed. Barcelona: Omega, 1982. 663p.

KATSURA, K; MAEDA S.; LUBIS, I.; HORIE, T.; CAO, W.; SHIRAIWA, T. The high yield of irrigated rice in Yunnan China: a cross-location analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.101, n.1, p.1-11, Apr. 2008.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and Tickle Irrigation**. New York: Chapman&Hall, 1990. 652p.

KOBATA, T.; MURSHIDUL, H.; ADACHI, F. Effect of soil compaction on dry matter production and water use of rice (*Oryza sativa* L.) under water deficit stress during the reproductive stage. **Plant Production Science**, Tokyo, v.3, n.3, p.306-315, 2000.

LARROSA, R.M.; CHURRUT, E.D. **Coberturas nitrogenadas para la producción de arroz parte i. eficiencia de aplicación**. Montevideo: INIA, 2009. 10p. Série Técnica.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. **Europa Journal Agronomy**, Amsterdam, v.28, n.1, p.614-624, 2008.

LEMOES, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 83p.

LIN, S.; LI, J.; SATTELMACHER, B.; BRÜCK, H. Response of Lowland and Aerobic Rice to Ammonium and Nitrate Supply During Early Growth Stages. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.28, n.9, p.1495-1510, 2005.

LINSCOMBE, S.; SHA, X.; WHITE, L. Rice Varieties and Variety Improvement. In: SAICHUK, J. **Louisiana Rice Production Handbook**. Louisiana: LSU AgCenter, 2009. chap. 2, p.16-33.

LU, J.; OOKAWA, T.; HIRASAWA, T. The effects of irrigation regimes on the water use, dry matter production and physiological responses of paddy rice. **Plant and Soil**, The Hague, v.223, n.1-2, p.207-216, 2000.

MARANO, R.P. Impacto de riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Santa Fe. In: TALLER DE RIEGO Y AMBIENTE, 1., 2008, Santiago del Estero. **Proceedings...** Santiago del Estero: INTA, PROCISUR, IICA, 2008. 1 CD-ROM.

MARANO, R.P; HERMANN, M.; CARNEVALE, I. Estudio de la dinámica hídrica del cultivo de soja de segunda en la región central de Santa Fe. In: CONGRESO DE SOJA DEL MERCOSUR, 3., 2006, Rosario, **Proceedings...** Rosario:ACTAS, 2006. 1 CD-ROM.

MARANO, R.P.; MAUMARY, R.L.; FERNANDEZ, L.N.; RISTA, L.M. Epidemiology of the diseases of wheat under different strategies of supplementary irrigation. **International Journal of Agronomy**, New York, v.2012, n.1, p.1-11, 2012.

MARANO, R.P.; FOLEGATTI M.V.; DOPAZO, N; ROUGIER, H. Avaliação da adubação com nitrogênio e manejos alternativos de água em arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42., Fortaleza, 2013. **Anais...** Fortaleza: SBEA, 2013. 1 CD-ROM.

MARANO, R.; ALBRECHT, G.; CAMUSSI, G.; PICCO, J.M.; ZUCCALI, E. Respuesta productiva del trigo bajo diferentes estrategias de riego suplementario. In: JORNADAS DE ACTUALIZACIÓN EN RIEGO Y FERTIRRIEGO, 6., 2012, Mendoza, **Proceedings...** Mendoza: INTA, 2012. 1 CD-ROM.

MARANO, R.P. **Diseño y operación de riego por aspersión**. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo, 2013. 24p.

MARCHEZAN, E. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no controle de arroz vermelho em várzea. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21, 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. P.151-153.

McCAULEY, G.N. Sprinkler vs. flood irrigation in traditional rice production regions of southeast Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, n.4, p.677-83, Aug. 1990.

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during steady rain. **Water Resources Research**, Washington, v.9, n.2, p.384-394, Apr. 1973.

MEZZOMO, R.F. **Irrigação contínua e intermitente em arroz irrigado**: uso de água, eficiência agronômica e dissipação de imazethapyr, imazapic e fipronil. 2009. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MISHRA, A. Intermittent Irrigation Enhances Morphological and Physiological Efficiency of Rice Plants. **Agriculture**, Piešťany, v.58, n.4, p.121-130, Dec. 2012.

MOSCONI, F.P.; PRIANO, L.J.J.; HEIN, N.E.; MOSCATELLI, G.; SALAZAR, J.C.; GUTIÉRREZ, T.; CÁCERES, L. **Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe**. Santa Fe: INTA-MAG, 1981.

MUZIO, S.N.; MARANO, R.P. **Evaluación de indicadores de desempeño de riego en el cultivo de arroz en el albardón costero santafesino**. Santa Fé: Faculdade de Ciências Agrárias – Universidade Nacional del Litoral, 2011. 1 CD-ROM.

NASCIMENTO, L.F.; SILVA, E.J.; NUNES, M.F.F.N.; SILVA, Ê.F.F. eficiência de aplicação em potencial dos sistemas de irrigação por gotejamento subterrâneo e pivô central na cana-de-açúcar. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UFRPE, 13., 2013, Recife. **Anais...** Recife: UFRPE, 2013. 1 CD-ROM.

NOBORIO, K.; KUDO, Y.; KATO, T.; SHIMOOZONO, N. Effects of Water Management Practices on Paddy Rice Yield and Emission of Greenhouse Gases. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 1., 2012, Valencia. **Proceedings...** Valencia: ASABE, 2012. 1 CD-ROM.

NORMAN, R.; WILSON, C.; SLATON, N. Soil Fertilization and mineral nutrition in U.S. mechanized rice culture. In: SMITH, C.W.; DILDAY, R.H. **Rice: Origin, history, technology and production**. New Jersey: Wiley Series in Crop Science, 2003. chap. 3.4, p.331-412.

OADES, J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v.56, n.1/4, p.377-400, Mar. 1993.

OCKERBY, S.; FUKAI, S. The management of rice grown on raised beds with continuous furrow irrigation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.69, n.3, p.215-269, Mar. 2006.

OLIVEIRA, M.S.L.; MARCHEZAN, E.; RIGHES, A.A.; CARLESSO, R.; CAZARROTO, S.C.; VILLA, E.; CAMARGO, E.R. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.65-71, 2006.

OSAKI, M.; SHINANO, T.; MATSUMOTO, M.; ZHENG, T.; TADANO, T. A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of field crops. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.43, n.1, p.1079-1084, 1997.

PAOLI, H.; SCREIDER, M. **El río Paraná en su tramo medio: contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura**. Santa Fe: Centro de Publicaciones UNL, 2000. 309p.

PATRA, A.K.; BURFORD, J.R.; REGO, T.J. Volatilization losses of surface-applied urea nitrogen from vertisols in the indian semiarid tropics. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.22, n.4, p.345-349, 1996.

PENG, S.; BOUMAN, B.; VISPERAS, R.M.; CASTAÑEDA, A.; NIE, L.; PARK, H.K. Comparison between aerobic and flooded rice in the tropics: Agronomic performance in an eight-season experiment. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.96, n.2/3, p.252-259, Apr. 2006.

PERROUX, K.M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.52 n.5, p.1205-1215, 1988.

PILATTI, M.A.; D'ANGELO, C.H.; MARANO, R.P.; PENSIERO, J.F.; POTENTE H. LÓPEZ C.A. **Ordenamiento territorial de la cuenca de Los Saladillos (Santa Fe)**. Santa Fe: UNL, 2003. 227p.

PILATTI, M.A.; GHIBERTO, P.J.; IMHOFF, S. Application of a general relationship between soil particle density and organic matter to Mollisols of Santa Fe (Argentina). In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CIENCIA DEL SUELO, 27., 2006, Filadelfia. **Proceedings...** Filadelfia: ISCO, 2006. 1 CD-ROM.

PILATTI, M.A.; GHIRBERTO, P.J.; IMHOFF, S. **Estimación de datos faltantes a partir de información básica de suelo**. Buenos Aires: FCA, 2004. 16p.

PILATTI, M.A.; NORERO, A.L.; GRENÓN, D.A. **Enfoque de sistemas y modelos de simulación de cultivos: Necesidad, formulaciones, usos y evaluación**. Madrid: Editorial Académica Española, 2011. 140 p.

PILATTI, M.A.; GRENÓN, D.A. Información química de Argiudoles del centro de Santa Fe. – I) Nitrógeno y Fósforo. **Revista FAVE sección Ciencias Agrarias**, Esperanza, v.7, n.1-2, p105-120. 2008

PINHEIRO, B.S.; CASTRO, E.M.; GUIMARAES, C.M. Sustainability and profitability of erobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.97, n.1, p.34–42, May 2006.

PINTO, J.M.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. influência de variáveis climáticas e hidráulicas no desempenho da irrigação de um pivô central no oeste baiano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.76-85, 2006.

POCOVI A. Petrografía de los suelos de la Provincia de Santa Fe. **Anales de la Sociedad Científica Argentina**, Buenos Aires, v.144, n.59, 107p., 1947.

POZZOLO, O.R.; Labranzas y maquinarias utilizadas en arroceras. In: BENAVIDEZ, R.A.(Ed.). **El arroz, su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos**. Concepción del Uruguay: UNER-UNL, 2006. chap. 3.2, p.345-358.

QUINTERO, C.; FIGUEROA, E.A. Fertilización del arroz. In: MELGAR R.; DÍAZ Z.M. **Fertilización de cultivos y pasturas**. Buenos Aires: INTA, 2008. chap. 3, p.156-189.

QUINTERO, C.; GUTIERREZ, B.F.; BEFANI, M.; BOSCHETTI, N. Effects of soil flooding on P transformations in soils of the Mesopotamia region, Argentina. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tokyo, v.170, n.4, p.500-505, Aug. 2007.

QUINTERO, C.E. **Factores limitantes para el crecimiento y productividad del arroz en Entre Ríos, Argentina**. 2009. 167p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidad de Coruña, Coruña. 2009.

QUINTERO, C; ZAMERO, M.A.; BOSCHETTI, G; BEFANI, M; ARÉVALO, E; SPINELLI, N. . Evaluación de los momentos óptimos para la aplicación del nitrógeno en arroz. In: QUINTERO, C. **Resultados experimentales 2010-2011**. Concepción del Paraguay: PROARROZ, EEA, INTA, 2009. chap. 10, p.101-106.

RAMONELL, C.G.; MARCHETTI, Z.Y.; BARBERIS I.M.; GIRAUDO, A.R.; BENZAQUÉN, L.; BLANCO, D.E.; BÓ, R.F.; KANDUS, P.; LINGUA, G.F.; MINOTTI, P.; QUINTANA, R.D.; SVERLIJ, S.; VIDAL, L.(Ed.) **Inventario de los Humedales de Argentina. Sistemas de paisajes de humedales del Corredor Fluvial Paraná-Paraguay**. Buenos Aires: Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2013. 380p.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.26, n.6, p.1747-1752, 1983.

REDDY, K.R. Nitrogen cycling in a flooded-soil ecosystem planted to rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v.67, n.1/3, p.209-220, 1982.

ROEL, A. Riego en arroz: Manejo eficiente de la inundación. **Boletín de divulgación**, v.67, n.33, 21p. 1999.

ROEL, A.; CAPURRO, M.C.; MARTINEZ, S. **Manejo del riego: productividad del agua: Resultados experimentales 2010-2011**. Concepción del Paraguay: INTA, 2012. 108p.

RUSSELL, C.A.; DUNN B.W.; DUNN, G.D.; WILLIAMS, R.L.; ANGUS J.F. Soil tests to predict optimum fertilizer nitrogen rate for rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.97, n.2/3, p.286-301, June 2006.

SAMANI, Z.; JORAT, S.; YOUSAF, M. Hydraulic characteristics of circular flume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.117, n.4, p.558-566, July 1991.

SAMEJIMA, H.; KONDO, M.; ITO, O.; NOZO, T.; SHINANO, T.; OSAKI M. Root-shoot interaction as a limiting factor of biomass productivity in new tropical rice lines. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.50, n.4, p.545-554, 2004.

SAMLA. **Recopilación de técnicas de laboratorio**. Buenos Aires, 2004. 60p.

SHAN L.; K. DITTEERT, HONGBIN TAO, C. KREYE, YANGCHU XU, QIRONG SHEN, XIAOLIN FAN, AND B. SATTELMACHER. The ground-cover rice production system (GCRPS): a successful new approach to save water and increase nitrogen fertilizer efficiency?. In: BOUMAN, B.A.M.; HENGSDIJK, H.; HARDY, B.; BINDRABAN, P.S.; TUONG, T.P.; LADHA, J.K. (Ed.) **Water-wise Rice Production**. Los Baños: IRRI, 2000. chap. 3.5, p.187-196.

SHEEHY, S.H; DIONORA, M.J.A.; MITCHELL, P.L.; PENG, S.; CASSMAN, K.G.; LEMAIRE, G.; WILLIAMS, R.L. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.59, n.1, p.31-41, Oct. 1998.

SHEEHYA, J.E.; DIONORAA, M.J.A.; MITCHELLB, P.L.; PENG, S.; CASSMANC K.G.; LEMAIRE, G.; WILLIAMS, R.L. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.59, n.1, p.31-41, Oct. 1998.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M. ;SAITO, H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN M.T.H. **The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media Version 4.08**. Riverside: University of California Riverside, 2009. 332p.

SMITH, M.C.; MASSEY, J.H.; BRANSON, J.; EPTING, J.W.; PENNINGTON, D.P.; TACKER, P.L.; THOMAS, J.; VORIES, E.D.; WILSON, C. Water use estimates for various rice production systems in Mississippi and Arkansas. **Irrigation Science**, New York, v.25, n.2, p.141–147, Jan. 2007.

SOSBAI. **Arroz irrigado**: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Porto Alegre: SOSBAI, 2010. 32p.

STEINMETZ, S.; FAGUNDES, P.R.R.; MAGALHAES JUNIOR, A.M.; SCIVITTARO, W.B.; DEIBLER, A.N.; ULGUIM, A.R.; NOBRE, F.L.L.; PINTANEL, J.B.A.; OLIVEIRA, J.G.; SCHNEIDER, A.B. **Soma térmica e número de dias para atingir os principais estádios de desenvolvimento de 16 cultivares de arroz irrigado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 31p.

STEPHAN, S.; DE PETRE, A.A.; ORELLANA, J.; PRIANO, L.J. Brunizem soils of the central part of the Province of Santa Fe (Argentina). **Pedologie**, Gent, v.27, n.3, p.255-283, 1977.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVA, S.C. **Tensão da água no solo e produtividade do arroz**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1986. 6p. (Comunicado Técnico).

STONE, L.F.; PEREIRA, A.L. Sucessão arroz-feijão irrigado por aspersão: Efeitos do espaçamento entre linhas, adubação e cultivar na produtividade e nutrição do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.11, p.1701-13, 1994.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Arroz irrigado por aspersão. **Informe Agropecuário**, v.25, n.222, p.70-76, 2004.

STOOP, W.A.; UPHOFF, N.; KASSAM, A. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. **Agricultural Systems**, Essex, v.71, n.3, p.249–274. Mar. 2002.

TABOADA, M.A.; LAVADO, R.S.; CAMILIÓN M.C. Cambios volumétricos en un Natracuol típico. **Ciencia del Suelo**, La Plata, v.6, n.2, p.151-157, 1988.

TABOADA, M.A.; LAVADO, R.S.; RUBIO, G.; COSENTINO, D.J. Soil volumetric changes in natric soils caused by air entrapment following seasonal ponding and water table rises. **Geoderma**, Amsterdam, v.101, n.3/4, p.49-64, Apr. 2001.

TAO, H.; BRUECK, H.; DITTERT, K.; KREYE, C.; LIN, S.; SATTELMACHER B. Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS). **Field Crops Research**, Amsterdam, v.95, n.1, p.1-12, 2006.

TARJUELO, J.M. **El Riego por Aspersión y su Tecnología**. Madri: Mundi-Prensa Libros, 2005. 581p.

TARJUELO, J.M.; MONTERO, J.; HONRUBIA, F.T.; ORTIZ, J.J.; ORTEGA J.F. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.40, n.2/3, p.315-331, May 1999.

THAKUR, A.K.; RATH, S.; PATIL, D.U.; KUMAR, A. Effects on rice plant morphology and physiology of water and associated management practices of the system of rice intensification and their implications for crop performance. **Paddy and Water Environment**, Tokyo, v.9, n.1, p.23-24, Mar. 2011.

TOESCHER, C.F.; RIGHES, A.A.; CARLESSO, R. Volume de água aplicada e produtividade do arroz sob diferentes métodos de irrigação. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.4, n.1, p.75-79, 1997. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fzva/article/viewArticle/1965>> Acesso em: 23 jan. 2014.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.1, p.573-581, 1998.

UNFPA. **Estado da população mundial**. New York, 2013. 100p.

VAN GENUTCHEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, Sept. 1980.

VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.M.; BYRNES, B.H. Urease activity and inhibition in flooded soil systems. **Fertilizer Research**, The Hague, v.1, n.2, p.191-202, 1980.

VRIES, M.E.; RODENBURG, J.; BADO, B.V.; SOW, A.; LEFFELAAR, P.A.; GILLER, K.E. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.116, n.1/2, p.154-164, 2010.

WEBER, L.O.; MARCHEZAN, E.; CARLESSO, R.; MARZARI, V. Cultivares de arroz irrigado e nutrientes na água de drenagem em diferentes sistemas de cultivos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.1, p.27-33, fev. 2003.

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

WITT, C.; DOBERMANN, A.; ABDULRACHMAN, S.; GINES, H.C.; WANG G.; NAGARAJAN, R.; SATAWATANANOT, S.; SON, T. T.; TAN, P. S.; TIEM L. V.; SIMBAHAN, G.C.; OLK, D.C. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.63, n.2, p.113-138, Sept. 1999.

XIANTING W.; YANYAN S.; YING F.; SHOHAG, M. J. I.; JUN G.; QICHUN Z.; SHUANG X.; XIANYONG L. Recovery of ¹⁵N-labeled urea and soil nitrogen dynamics as affected by irrigation management and nitrogen application rate in a double rice cropping system. **Plant and Soil**, The Hague, v.343, n.1/2, p.195-208, June 2011.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981. 279p.

YOSHIDA, S.; CORONEL, V. Nitrogen nutrition, leaf resistance, and leaf photosynthetic rate of the rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.22, n.2, p.207-211, 1976.

ZHANG, Y.; ZHOU, Y.; DU, B.; YANG, J. Effects of Nitrogen Nutrition on Grain Yield of Upland and Paddy Rice Under Different Cultivation Methods. **Acta Agronomica Sinica**, Amsterdam, v.34, n.6, p.1005-1013, June 2008.

ANEXOS

RICE DEVELOPMENTAL TIME LINE

Figura 89 – Escala fenológica para os estádios de crescimento e mudanças morfológicas da planta de arroz

Fonte: Counce et al. (2000)

Figura 90 – Triângulo de classificação textural e densidade de solos
 Fonte: PILATTI, GHIBERTO e IMOFF (2004)

Tabela 48 – Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), índice de colheita (IC), percentagem de espiguetas férteis (%E), fertilidade de espiguetas (FE), número de espiguetas totais (NEt), número de panículas a colheita (N°Pan), biomassa aérea total (BAT), número de colmos no estádio R2 (N°coR2), biomassa de folhas verdes no estádio R2 (BFV-R2), biomassa aérea total no estádio R2 (BAT-R2), índice de área foliar no estádio R2 (IAF-R2) e biomassa de bainha + colmo no estádio R2 (BB+C-R2), para a safra 2012-13, San Javier, Argentina

	PG	IC	%E	NEt	N°Pan	BAT- C	N°co R2	BFV- R2	BAT R2	IAF R2	BB+C R2
PG	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IC	-0,2 ns	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
%E	0,17 ns	-0,22 ns	1	-	-	-	-	-	-	-	-
NEt	0,63 ***	-0,34 ns	0,16 ns	1	-	-	-	-	-	-	-
N°Pan	0,65 ***	-0,32 ns	0,2 ns	0,48 *	1	-	-	-	-	-	-
BAT-C	0,92 ***	-0,56 **	0,24 ns	0,67 ***	0,67 ***	1	-	-	-	-	-
N°col R2	0,52 *	-0,2 ns	0,08 ns	0,54 **	0,37 *	0,54 **	1	-	-	-	-
BFV-R2	0,63 ***	-0,47 *	0,3 ns	0,69 ***	0,48 **	0,72 ***	0,78 ***	1	-	-	-
BAT R2	0,63 ***	-0,36 ns	0,31 ns	0,63 ***	0,41 *	0,68 ***	0,78 ***	0,97 ***	1	-	-
IAF R2	0,58 **	-0,59 **	0,36 ns	0,73 ***	0,58 **	0,73 ***	0,66 ***	0,9 ***	0,8 ***	1	-
BB+C R2	0,61 ***	-0,27 ns	0,3 ns	0,56 **	0,34 ns	0,61 ***	0,74 ***	0,9 ***	0,98 ***	0,7 ***	1

Nota - * significância F com $P \leq 0,05$; **significância F com $P \leq 0,01$; ***significância F com $P \leq 0,001$ ns, não significativo

Tabela 49 – Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), índice de colheita (IC), percentagem de espiguetas férteis (%E), fertilidade de espiguetas (FE), número de espiguetas totais (NEt), número de panículas a colheita (N°Pan), biomassa aérea total na colheita (BAT-C), número de colmos no estágio R2 (N°coR2), biomassa de folhas verdes no estágio R2 (BFV-R2), biomassa aérea total no estágio R2 (BAT-R2), índice de área foliar no estágio R2 (IAF-R2) e biomassa de bainha + colmo no estágio R2 (BB+C-R2), para a safra 2011-12, San Javier, Argentina

	PG	IC	%E	NEt	N°Pan	BAT- C	N°col R2	BFV- R2	BAT R2	IAF R2	BB+C R2
PG	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IC	0,69 ***	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
%E	-0,65 ***	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
NEt	0,8 ***	0,69 ***	-0,43 *	1	-	-	-	-	-	-	-
N°Pan	0,78 ***	0,36 ns	-0,65 ***	0,38 ns	1	-	-	-	-	-	-
BAT-C	0,86 ***	0,24 ns	-0,58 **	0,64 ***	0,8 ***	1	-	-	-	-	-
N°col R2	0,2 ns	0,13 ns	0,31 ns	0,16 ns	0,08 ns	0,14 ns	1	-	-	-	-
BFV-R2	0,56 **	0,32 ns	-0,22 ns	0,37 ns	0,39 ns	0,48 *	0,58 ***	1	-	-	-
BAT R2	0,61 **	0,4 *	-0,23 ns	0,42 *	0,41 *	0,5 **	0,68 ***	0,92 ***	1	-	-
IAF R2	0,52 *	0,16 ns	-0,22 ns	0,36 ns	0,38 ns	0,56 ***	0,43 *	0,81 ***	0,75 ***	1	-
BB+C R2	0,59 **	0,35 ns	-0,21 ns	0,38 ns	0,42 *	0,52 **	0,71 ***	0,85 ***	0,98 ***	0,71 ***	1

Nota - * significância F com $P \leq 0,05$; ** significância F com $P \leq 0,01$; *** significância F com $P \leq 0,001$ ns, não significativo

Tabela 50– Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), biomassa de folhas verdes no estágio R6 (BFV-R6), biomassa aérea total no estágio R6 (BAT-R6), índice de área foliar no estágio R6 (IAF-R6), biomassa de bainha + colmo no estágio R6 (BB+C-R6), biomassa de panículas no estágio R6 (BP-R6), biomassa de folhas secas no estágio R6 (BFS-R6), número de colmos em perfilhamento ativo (N°colm PA), índice de área foliar em perfilhamento ativo (IAF PA), absorção de N total (AbNT) e nos grãos (AbNG) para a safra 2012-13, San Javier, Argentina

	PG	BFV-R6	BAT-R6	IAF-R6	BB+C-R6	BP-R6	BF S-R6	Ncol m PA	IAF PA	AbN T	AbN G
PG	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BFV-R6	0,41 *	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BAT-R6	0,47 **	0,79 ***	1	-	-	-	-	-	-	-	-
IAF-R6	0,42 *	0,96 ***	0,81 ***	1	-	-	-	-	-	-	-
BB+C-R6	0,55 ***	0,71 ***	0,86 ***	0,74 ***	1	-	-	-	-	-	-
BP R6	0,01 ns	0,13 ns	0,55 ***	0,15 ns	0,14 ns	1	-	-	-	-	-
BFS R6	0,19 ns	0,17 ns	0,38 *	0,27 ns	0,17 ns	0,27 ns	1	-	-	-	-
Ncol PA	0,43 *	0,43 *	0,4 *	0,48 **	0,4 *	0,1 ns	0,01 ns	1	-	-	-
IAF PA	0,41 *	0,49 **	0,39 *	0,53 ***	0,34 ns	0,1 ns	0,05 ns	0,66 ***	1	-	-
AbNT	0,74 ***	0,51 **	0,49 **	0,52 **	0,48 **	0,09 ns	0,18 ns	0,42 *	0,53 ***	1	-
AbNG	0,84 ***	0,44 *	0,52 **	0,44 *	0,49 **	0,21 ns	0,22 ns	0,37 ns	0,46 *	0,79 ***	1

Nota - * significância F com $P \leq 0,05$; ** significância F com $P \leq 0,01$; *** significância F com $P \leq 0,001$ ns, não significativo

Tabela 51– Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), biomassa de folhas verdes no estágio R6 (BFV-R6), biomassa aérea total no estágio R6 (BAT-R6), índice de área foliar no estágio R6 (IAF-R6), biomassa de bainha + colmo no estágio R6 (BB+C-R6), biomassa de panículas no estágio R6 (BP-R6), biomassa de folhas secas no estágio R6 (BFS-R6), número de colmos em perfilhamento ativo (N°colm PA), índice de área foliar em perfilhamento ativo (IAF PA), absorção de N total (AbNT) e nos grãos (AbNG) para a safra 2011-12, San Javier, Argentina

		BA					BF	Ncol			
	PG	BFV -R6	T R6	IAF R6	BB+ C R6	BP R6	S R6	m PA	IAF PA	AbN T	AbN G
PG	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BFV- R6	0,53 **	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BAT R6	0,1 ns	0,69 ***	1	-	-	-	-	-	-	-	-
IAF R6	0,49 *	0,96 ***	0,7 ***	1	-	-	-	-	-	-	-
BB+C R6	-0,11 ns	0,48 *	0,91 ***	0,48 *	1	-	-	-	-	-	-
BP R6	0,43 *	0,58 ***	0,39 ns	0,62 ***	0,03 ns	1	-	-	-	-	-
BFS R6	-0,32 ns	- ns	0,49 *	- ns	0,49 **	-0,09 ns	1	-	-	-	-
Ncol PA	-0,33 ns	- ns	0,21 ns	- ns	0,44 *	-0,49 **	0,26 ns	1	-	-	-
IAF PA	0,44 *	0,54 **	0,12 ns	0,6 ***	-0,09 ns	0,56 **	- 0,42 *	-0,21 ns	1	-	-
AbNT	0,86 ***	0,49 *	0,11 ns	0,44 *	-0,13 ns	0,55 **	-0,3 ns	-0,36 ns	0,35 ns	1	-
AbNG	0,95 ***	0,53 **	0,21 ns	0,48 *	-0,01 ns	0,51 **	- 0,22 ns	-0,26 ns	0,35 ns	0,95 ***	1

Nota - * significância F com $P \leq 0,05$; ** significância F com $P \leq 0,01$; *** significância F com $P \leq 0,001$ ns, não significativo

Tabela 52 – Coeficientes de correlação de Pearson para produtividade (PG), lâmina de irrigação bruta (Lib), líquida (LiL), evapotranspiração real (ETr) das safras 2011-12 e 2012-13, San Javier, Argentina

safra 2011-12					safra 2012-13				
	PG	Lib	LiL	ETr		PG	Lib	LiL	ETr
PG	1	-	-	-	PG	1	-	-	-
	0,15					0,19			
Lib	ns	1	-	-	Lib	ns	1	-	-
		0,77				0,28	0,77		
LiL	0,53 **	***	1	-	LiL	ns	***	1	-
	0,22	0,83				0,37			
ETr	ns	***	0,71 ***	1	ETr	ns	0,41 *	0,85 ***	1

Nota - * significância F com $P \leq 0,05$; ** significância F com $P \leq 0,01$; *** significância F com $P \leq 0,001$ ns, não significativo

Tabela 53 – Estimativa de absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos (ADNEG), para adubação parcelada (AP) e total (AT) do fator momento ótimo de aplicação (MOA) e os manejos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2011-12, San Javier, Argentina

Passos	MOA		Manejos da água		
	AP	AT	AS	Ic	In
1 (%)	1,21	1,2	1,27	1,17	1,18
2 (kg N ha ⁻¹)	97,4	93,1	84,1	99,1	102,5
3(kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	326	326	258	358	363
4 (kg N ha ⁻¹ dia ⁻¹)	3,9	3,9	3,3	4,2	4,3
4 (kg N ha ⁻¹)	55,2	54,8	45,8	58,6	59,9
5 (kg ha ⁻¹)	4.098	3.818	3.416	4.176	4.280
6 (%)	1,03	1,02	1,14	0,99	1,00
7 (kg N ha ⁻¹)	42,1	38,9	39,0	41,5	42,9
8 (kg N ha ⁻¹)	97,3	93,7	84,8	100,1	102,9
9 (%)	-0,1	0,7	0,9	1,0	0,4
10 (%)	0,58	0,53	0,58	0,56	0,53
11 (kg N ha ⁻¹)	55,1	54,6	48,1	59,8	56,8
12 (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)	-397,4	-517,9	-615,8	-350,7	-406,6
12 (kg N ha ⁻¹ dia ⁻¹)	-2,3	-2,7	-3,6	-2,0	-2,2
13 (kg N ha ⁻¹)	-32,3	-38,4	-50,0	-27,5	-30,2
14 (kg ha ⁻¹)	3.380	3.555	2.824	3.821	3.759
14(kg ha ⁻¹)	8.820	10.451	10.493	8.839	9.573
15 (10 ⁻²)	0,0093	0,0090	0,0110	0,0085	0,0082
15 (10 ⁻²)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
16 (kg N ha ⁻¹)	87,7	92,9	98,0	86,9	86,6
17 (kg N ha ⁻¹)	55,4	54,5	48,0	59,4	56,5
18 (%)	0,6	-0,2	-0,2	-0,6	-0,6
19 (kg N ha ⁻¹)	22,9	16,4	0,0	31,1	29,8
19 (kg N ha ⁻¹ dia ⁻¹)	1,6	1,2	0,0	2,2	2,1
20 (kg N ha ⁻¹)	32,3	38,4	50,0	27,5	30,2

Tabela 54— Estimativa de absorção e deslocamento de N no período de enchimento dos grãos (ADNEG), para testemunha (T0), doses T1 e T2 e os tratamentos aspersão (AS), inundação contínua (Ic) e intermitente (In) do arroz, safra 2012-13, San Javier, Argentina

Passos	Doses de adubação N			Manejos da água		
	T0	T1	T2	AS	Ic	In
1 (%)	0,99	1,02	0,96	1,03	0,95	0,99
2 (kg N ha ⁻¹)	74,4	92,5	93,3	85,89	84,51	89,89
3(kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	248	324	431	312	348	343
4 (kg N ha ⁻¹ dia ⁻¹)	2,5	3,3	4,1	3,2	3,3	3,4
4 (kg N ha ⁻¹)	34	46	58	45	46	48
5 (kg ha ⁻¹)	4595	5098	4277	4533	4604	4833
6 (%)	0,89	0,92	0,86	0,93	0,86	0,89
7 (kg N ha ⁻¹)	40,9	46,8	37,0	42,0	39,4	43,1
8 (kg N ha ⁻¹)	75	93	95	87	86	91
9 (%)	1,2	0,7	1,6	1,3	1,3	0,8
10 (%)	0,67	0,64	0,84	0,7	0,66	0,79
11 (kg N ha ⁻¹)	56,5	69,9	100,8	75,8	69,8	81,6
12 (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)	54,1	27,4	115,8	65,4	99,4	32,5
12 (kg N ha ⁻¹ dia ⁻¹)	0,4	0,2	1,0	0,5	0,7	0,3
13 (kg N ha ⁻¹)	5,1	2,5	13,6	6,4	9,2	3,6
14 (kg ha ⁻¹)	1.374	2.289	2.287	2.330	1.768	1.851
14(kg ha ⁻¹)	5.040	6.718	6.732	6.139	5.929	6.422
15 (10 ⁻²)	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
15 (10 ⁻²)	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8
16 (kg N ha ⁻¹)	57,7	81,6	90,8	82,2	69,6	81,0
17 (kg N ha ⁻¹)	62,8	84,1	104,5	88,6	78,8	84,6
18 (kg N ha ⁻¹)	6,3	14,2	3,7	12,9	8,9	3,0
19 (kg N ha ⁻¹)	28,0	32,1	54,2	32,1	37,4	44,5
19 (kg N ha ⁻¹ dia ⁻¹)	2,0	2,3	3,9	2,3	2,7	3,2
20 (kg N ha ⁻¹)	6,3	14,2	3,7	12,9	8,9	3,0