

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTADO NUTRICIONAL DO MILHO AVALIADO POR
ESPECTROSCOPIA ÓPTICA NO PARAGUAI**

TESE DE DOUTORADO

Enrique Oswin Hahn Villalba

Santa Maria, RS, Brasil

2012

ESTADO NUTRICIONAL DO MILHO AVALIADO POR ESPECTROSCOPIA ÓPTICA NO PARAGUAI

Enrique Oswin Hahn Villalba

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil

2012

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

Villalba, Enrique Oswin Hahn
Estado nutricional do milho avaliado por
espectroscopia óptica no Paraguai / Enrique Oswin Hahn
Villalba.-2012.
132 p.; 30cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2012

1. Zea mays 2. Agricultura de precisão 3. Nitrogênio
4. Sensoriamento óptico 5. Plantio direto I. Amado, Telmo
Jorge Carneiro II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por

Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2012

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

Endereço: Rua André Marques, n. 766, Bairro Centro, Santa Maria, RS. CEP: 97010-040. Fone (002) 55 55 33473293; E-mail: enriqueohahn@hotmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado**

**ESTADO NUTRICIONAL DO MILHO AVALIADO POR
ESPECTROSCOPIA ÓPTICA NO PARAGUAI**

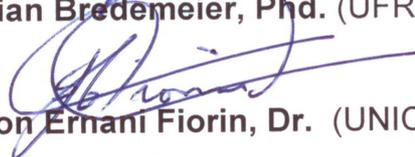
elaborada por
Enrique Oswin Hahn Villalba

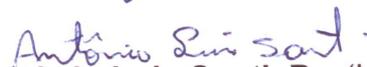
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

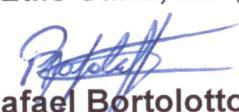
COMISSÃO EXAMINADORA:


Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr.
(Presidente/Orientador)


Christian Bredemeier, Phd. (UFRGS)


Jackson Ernani Fiorin, Dr. (UNICRUZ)


Antônio Luis Santi, Dr. (UFSM/ CESNORS)


Rafael Bortolotto, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 03 de setembro de 2012

*DEDICADO A MI COMPAÑERA ADRIANA,
POR SU COMPRENSIÓN, AMOR Y TRABAJO,
POR PERMITIRME SOÑAR JUNTOS...*

.

OTORGO ESTA TESIS :

*A MI MADRE ESTHER, POR RECIBIRME UN 19 DE AGOSTO, POR SU CARIÑO DE SIEMPRE, SU
CONFIANZA, Y SU LUCHA POR MI EDUCACIÓN...*

*A MI PADRE EUGENIO, POR SUS SABIOS CONSEJOS, EJEMPLO DE LUCHA Y TRABAJO, POR
TRANSMITIRME SU ACTITUD, EMPUJE Y FORTALEZA EN CADA DESAFÍO AFRONTADO...*

AGRADECIMENTOS

Aos integrantes de minha querida família, pessoas as quais devo tudo.

A Adriana e sua querida família pelo apoio constante.

Ao meu orientador Prof. Telmo Amado, pela amizade, pelo exemplo de trabalho profissional e pelo apoio nos momentos que precisava. Aos colegas das disciplinas cursadas pelas discussões técnicas e a troca de experiência.

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela possibilidade da realização do doutorado.

Ao Programa PEC-PG (Programa Convênio Estrangeiros - Brasil) e a CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

Aos técnicos companheiros do setor de Assistência Técnica Agropecuária da Cooperativa Colônias Unidas Diego Bonussi y Orlando Gallas pelo apoio nesta pesquisa.

Ao INBIO Instituto de Biotecnología Agrícola pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Ao colega Ricardo Melchiori do INTA Argentina pela grande contribuição técnica neste trabalho de pesquisa.

Ao nosso promissório time de pesquisa no Paraguai Sustentap e Sustenlab, especialmente meu parceiro e amigo Ing. Agr. MSc. Ramiro Samaniego pela confiança e apoio incondicional.

Aos meus amigos Federico Barreto, José Volpe, Atahualpa Ayala e Enrique León paraguaios encontrados na UFSM, pelo convívio, amizade e apoio. Aos meus amigos brasileiros de Santa María, principalmente a turma do padel e do laboratório.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1

- Figura 1 - Representação das precipitações diárias e acumuladas ocorridas nos experimentos durante o ciclo da cultura do milho na safra 2010 (a) e na safra 2011 (b) Alto Verá, Paraguai.....48
- Figura 2 - Rendimento de grãos em kg ha^{-1} (a) e produtividade parcial do fator (PPF) em kg kg^{-1} (b) em função das doses de Nitrogênio. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.....53
- Figura 3 - Produtividade parcial do fator (PPF) em kg kg^{-1} (a) e a eficiência agrônômica do uso de N (EAN) em kg kg^{-1} (b) em função das doses de N. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011..... 55
- Figura 4 - Eficiência aparente de recuperação de N (ERN) em kg kg^{-1} (a) , balanço parcial de N (BPN) em kg kg^{-1} (b) e eficiência fisiológica de N (EFN) em kg kg^{-1} (c) em função das doses de N. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.....58
- Figura 5 - Benefício econômico da adubação de N (BEN) em $\text{US\$ ha}^{-1}$ em função das doses de Nitrogênio. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.....61

ARTIGO 2

- Figura 1 - Representação das precipitações diárias e acumuladas ocorridas nos experimentos durante o ciclo da cultura do milho na safra 2010 (a) e na safra 2011 (b) Alto Verá, Paraguai.....72
- Figura 2 - Sensor Greenseeker utilizado para leituras de NDVI no experimento. Paraguai, 2010/2011.....75
- Figura 3 - Relação entre o desenvolvimento da biomassa acumulada e as doses de N aplicado no milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), Paraguai 2010 e 2011.....80
- Figura 4 - Relação entre o N absorvido e as doses de N aplicado no milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), Paraguai 2010 e 2011.....81
- Figura 5 - Relação entre o NDVI e as doses de N aplicado no milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), Paraguai 2010 e 2011.....83
- Figura 6 - Índice de Resposta de NDVI calculado entre tratamentos 180 e 30 kg ha^{-1} de N.....84
- Figura 7 - Correlação entre o N absorvido e biomassa acumulada na parte aérea obtido nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), V6-V14(f) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.....86
- Figura 8 - Correlação entre o NDVI e a Biomassa acumulada do milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), V6-V14 (f) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.....88
- Figura 9 - Correlação entre o NDVI e o N absorvido do milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e) V6-V14 (f) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.....90
- Figura 10 - Produtividade de grãos de milho em função de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai, Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.....91
- Figura 11 - Correlação entre o N absorvido e produtividade de grãos obtido nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.....93

Figura 12 - Correlação entre o NDVI e a produtividade de grãos obtido nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.....95

ARTIGO 3

Figura 1 - Representação das precipitações diárias e acumuladas ocorridas nos Experimentos durante o ciclo da cultura do milho na safra 2010/11 Alto Verá, Paraguai.....106

Figura 2 - Biomassa acumulada na parte aérea (a), N absorvido (b) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (c) no estádio V8 e V12 do milho em função das doses de N aplicado. Paraguai, safra 2010/11.....111

Figura 3 - Rendimento de grãos e nitrogênio absorvido em função das combinações de doses em N em semeadura e cobertura sob 3 níveis de N aplicado (60, 90 e 120 kg ha⁻¹). Paraguai, 2011.....118

Figura 4 - Produtividade parcial do fator (PPF) e a eficiência agrônômica do uso do N (EAN) em função das combinações de doses em N em semeadura e cobertura sob 3 níveis de N aplicado (60, 90 e 120 kg ha⁻¹). Paraguai, safra 2010/11.....120

Figura 5 - Balanço parcial do N e eficiência de recuperação do N em função das combinações de doses em N em semeadura e cobertura sob 3 níveis de N aplicado (60, 90 e 120 kg ha⁻¹). Paraguai, 2011.....122

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1 - Caracterização da fertilidade do solo antes da instalação do experimento, na camada 0-0,10 m de profundidade, Alto Verá, Itapúa, Paraguay.....	47
Tabela 2 - Descrição das características dos Experimentos conduzidos em Alto Verá,Paraguai	49
Tabela 3 - Índices Agronômicos gerados da resposta do milho a doses de N em cobertura sob doses de N em semeadura. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011	52
Tabela 4 – Tratamentos com valores na faixa ótima proposta de eficiência de uso de nitrogênio. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.....	60

ARTIGO 2

Tabela 1 - Caracterização da fertilidade do solo antes da instalação do experimento, na camada 0-0,10 m de profundidade, Alto Verá, Itapúa, Paraguay.....	71
Tabela 2 - Descrição das características dos Experimentos conduzidos em Alto Verá, Paraguai	73
Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos de planta avaliados no desenvolvimento vegetativo do milho nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.....	76

ARTIGO 3

Tabela 1 - Caracterização da fertilidade do solo antes da instalação do experimento, na camada 0-0,10 m de profundidade, Alto Verá, Itapúa, Paraguai.....	105
Tabela 2 - Descrição das características do Experimento conduzido em Alto Verá, Paraguai na safra 2010/11.....	108
Tabela 3 - Índices agronômicos gerados da resposta do milho em função das doses de N em cobertura sob níveis de N em semeadura. Paraguai, Safra 2010/11	116
Tabela 4 - Tratamentos com valores de EUN ótima nas doses de N aplicado. Paraguai, 2011	123

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Croqui de Bloco Experimental utilizados nos experimentos.....	131
Anexo B – Imagens do Experimento.....	132

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Índices agronômicos para manejo eficiente de adubação nitrogenada no milho.....	21
2.2 Manejo localizado de N em cultivos com utilização de sensores óticos ativos.....	27
2.3 Referencias Bibliográficas	31
3 HIPÓTESES.....	39
4 OBJETIVOS.....	41
4.1 Objetivo Geral.....	41
4.2 Objetivos Específicos	41
5 ARTIGO 1: ATRIBUTOS FITOTÉCNICOS E EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE N PELO MILHO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGÊNADA NO PARAGUAI.....	43
5.1 Resumo	43
5.2 Abstract.....	44
5.3 Introdução.....	45
5.4 Material e Métodos	46
5.4.1 Localização e caracterização edafoclimática da região de estudo.....	46
5.4.2 Delineamentos, unidades experimentais e tratamentos.....	47
5.4.3 Características, condução e avaliações feitas nos experimentos.	48
5.5 Resultados e Discussão	51
5.5.1 Rendimento de grãos e o N absorvido em função das doses de N.....	52
5.5.2. Produtividade parcial do fator (PPF)) e a eficiência agrônômica do uso de N (EAN) em função da fertilização nitrogenada.	54
5.5.3 ERN, BPN e a EFN em função das doses de N. Eficiência aparente da recuperação de N (ERN), balanço parcial do nutriente (BPN), e eficiência fisiológica do N (EFN) em função das doses de N.....	56
5.5.4 Benefício econômico da adubação de N (BEN) em função das doses de N....	60
5.6 Conclusões	62
5.7 Referências bibliográficas.....	62
6 ARTIGO 2: ESTADO NUTRICIONAL E RENDIMENTO DO MILHO AVALIADO PELO NDVI OBTIDO COM ESPECTROSCOPIA ÓPTICA.....	67
6.1 Resumo	67

6.2 Abstract	68
6.3 Introdução	69
6.4 Materiais e Métodos	70
6.4.1 Localização e caracterização edafoclimática da região de estudo	70
6.4.2 Características, condução e avaliações feitas nos experimentos	73
6.4.3 Delineamentos, unidades experimentais e tratamentos	73
6.4.4 Uso do sensor óptico, determinação do Nitrogênio absorvido e biomassa acumulada na parte aérea	74
6.5 Resultados e Discussão	76
6.5.1 Biomassa acumulada e N absorvido na parte aérea no desenvolvimento do milho em função do Nitrogênio aplicado	78
6.5.2 NDVI em diferentes estádios fenológicos do milho em função das doses de nitrogênio aplicado.....	82
6.5.3 Utilização do sensor óptico ativo na estimativa da nutrição nitrogenada e na caracterização do potencial produtivo do milho	85
6.6 Conclusões	96
6.7 Referências	97

7 ARTIGO 3: EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGÊNADA DE COBERTURA TARDIA DO MILHO VISANDO AO USO DO SENSOR ÓPTICO ATIVO NO PARAGUAI	101
7.1 Resumo	101
7.2 Abstract	102
7.3 Introdução	103
7.4 Material e Métodos	105
7.4.1 Localização e caracterização edafoclimática da região de estudo	105
7.4.2 Delineamento experimental e os tratamentos utilizados.....	106
7.4.3 Características, condução e avaliações feitas nos experimentos	107
7.5 Resultados e Discussão	110
7.5.1 Atributos de planta e nutrição do milho nos estádios V8 e V12.	110
7.5.2 Cálculo dos índices agrônômicos em função das doses de nitrogênio em cobertura no milho	112
7.5.3 Avaliação combinada dos índices agrônômicos baseados na adubação de cobertura tardia de N no milho.....	117
7.6 Conclusões	124
7.7 Referências	124

1 INTRODUÇÃO

A maior parte do desenvolvimento e crescimento do Paraguai está ligada ao setor agrícola, sendo o milho um dos cultivos de maior importância. No ano 2011 foram cultivadas 736.690 ha de milho no Paraguai, estimando-se uma produção de 3.126.497 toneladas dos quais 52% foi exportada para o Brasil (CAPECO, 2011).

O milho é uma planta de grande importância comercial para o Paraguai, é uma cultura muito responsiva ao nitrogênio (N) sendo essencial para seu desenvolvimento.

No Brasil, tradicionalmente, se recomenda o parcelamento da adubação nitrogenada visando aplicar as maiores porções do nutriente quando as plantas têm sistema radicular suficientemente desenvolvido para absorvê-lo e minimizar riscos de perdas por lixiviação ou desnitrificação com adubações antecipadas. Já nos Estados Unidos, percebem vantagem operacional em antecipar a adubação da cultura de milho em plantio direto e aplicar todo o nitrogênio na semeadura ou próximo desta. No Paraguai, as fertilizações de N no milho ainda em grande parte são realizadas integralmente na semeadura. Isto devido à falta de equipamentos distribuidores de N principalmente nos estabelecimentos dos produtores familiares com superfície menores que 50 hectares.

Na prática tradicional de adubar N com única dose resultam em fornecer N às plantas em áreas com variabilidade com doses acima ou abaixo do ótimo para o desenvolvimento do milho, isto ocasiona perdas ambientais e econômicas para o produtor agrícola.

A agricultura de precisão permite localizar os insumos de acordo à variabilidade encontrada em solo e planta e com os avanços tecnológicos na agricultura, sensores ópticos, ativos ou passivos estão se tornando mais presentes nas fazendas rurais, já sendo comercializados e com a possibilidade melhorar eficiência de uso de N em diversas culturas.

Os vegetais podem ser monitorados com técnicas de reflectância de espectroscopia óptica, atuando como forma de identificar a curva de acúmulo de biomassa e N absorvido das culturas ao longo do seu ciclo. Vários estudos indicam o

estado nutricional das plantas, e o rendimento de grãos estão relacionados à reflectância espectral da vegetação.

A reflectância dos sensores foi adaptada para uso em nível terrestre. Um dos sensores desenvolvidos foi o sensor Greenseeker (NTECH INDUSTRIES). Este aparelho utiliza diodos de emissão de radiação nas faixas do vermelho (650 nm) e infravermelho próximo (770 nm). A leitura de reflectância é calculada por um microprocessador interno, fornecendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é transmitido a um computador portátil adaptado ao sensor. A principal vantagem deste equipamento é a possibilidade de realizar um grande número de amostragens não destrutivas e rápidas, admitindo a leitura em tempo real em diversos pontos da lavoura, em alta resolução espacial, permitindo a observação da variabilidade espacial.

O conhecimento sobre a eficiência do uso do N, a identificação doses e momentos de adubação de N, que geram maior benefício econômico e menor risco ambiental com tecnologias, que identifiquem rapidamente as deficiências de N como promete a espectroscopia óptica, desperta um grande interesse aos pesquisadores, na constante busca de gerar recomendações aprimoradas.

A determinação do potencial de rendimento de grãos de milho em diversos ambientes, sob diferentes sistemas de condução, é uma ferramenta importante para a tomada de decisões no manejo da cultura, por possibilitar a identificação dos fatores limitantes. Este trabalho realizado no Paraguai propõe estratégias de adubação de N e o uso de índices agrônômicos para estimar sua eficiência e fornecer informações para avançar no entendimento da fertilização nitrogenada e sua relação com a nutrição do cultivo. Assim também avaliar o uso da técnica da espectroscopia óptica a traves da reflectância do sensor óptico ativo Greenseeker (NTECH INDUSTRIES) e seu comportamento como um possível estimador nutricional no desenvolvimento do milho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Índices agronômicos para manejo eficiente de adubação nitrogenada no milho.

Dados atualizados de USDA (2011) indicam que a produção mundial de milho está em torno 828 milhões de toneladas, sendo 316 milhões de toneladas produzidas nos Estados Unidos, 177 milhões na China, 57 milhões no Brasil, na Argentina 22 milhões de toneladas e França 13 milhões de toneladas de milho. Apesar de o Brasil ser o terceiro maior produtor do cereal, a produtividade média é baixa (4170 kg ha^{-1}) quando comparada com a da China (5450 kg ha^{-1}), Argentina (6250 kg ha^{-1}) e principalmente com a dos Estados Unidos (9590 kg ha^{-1}) e a França (9010 kg ha^{-1}).

Informes da Câmara Paraguaia de Exportadores de Cereais e Oleaginosas (CAPECO, 2011) demonstram na safra 2010-2011 para o Paraguai uma produção total de três milhões de toneladas de milho com uma produtividade média de 4746 kg ha^{-1} , maior (12%) na comparação com a produtividade do milho em Brasil no mesmo ano. A estatística nos últimos dez anos (2002-2011) apresenta produtividade média em grãos de milho para o Paraguai em torno de 3120 kg ha^{-1} .

Segundo Melgar (2006) as altas produtividades de milho encontradas em alguns países estão ligadas ao maior uso de fertilizantes nitrogenados sendo que as altas produtividades de Estados Unidos e França são proporcionais as altas doses com uma média de aplicação de 157 e 163 kg ha^{-1} de nitrogênio (N) respectivamente e no Brasil a média da adubação no cultivo é de 48 kg ha^{-1} , situação que pode explicar sua menor produtividade.

O milho é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes, especialmente os nitrogenados. O suprimento inadequado de N é considerado um dos principais fatores limitantes á produtividade de grãos do milho, pois o N exerce importante função nos processos bioquímicos da planta. Ele é constituinte de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucléicos, fitocromos e da clorofila (CANTARELLA, 1993).

Entre os fatores responsáveis pela melhorada produtividade da cultura do milho nos últimos anos, está o aumento expressivo do uso dos fertilizantes nitrogenados. Segundo Escosteguy et al. (1997) e Uhart e Andrade (1995), o N determina o desenvolvimento das plantas de milho, com aumento significativo na área foliar e na produção de massa de matéria seca, resultando em maior produtividade de grãos.

As exigências por N nos estádios iniciais de desenvolvimento das culturas de milho, apesar de serem pequenas, são importantes para promover um rápido desenvolvimento inicial e definir a produção potencial dessas culturas (FANCELLI; DOURADO NETO, 1996; RITCHIE et al., 1993). Nesse sentido, pesquisas verificaram que a aplicação antecipada de N em pré-semeadura do milho pode ser uma alternativa para aumentar a disponibilidade de N no solo. Porém, deve-se ressaltar que a disponibilidade do N no solo proveniente da adubação nitrogenada é influenciada, além da relação C/N, por outros fatores, como o tipo de solo e a precipitação pluviométrica, que variam conforme o ano e o local (SÁ, 1996; BASSO; CERETTA, 2000).

Os grãos de milho são a parte colhida os quais removem N do sistema. Dados de pesquisa sobre o conteúdo de nitrogênio nos grãos demonstram que entre 12 e 20 kilogramas de N são exportados por cada tonelada de grãos de milho colhida, dependendo do potencial produtivo ligado ao tipo de solo e a região produtiva (CIAMPITTI; GARCÍA, 2007; MALAVOLTA, 1976; VAN RAIJ, 1991).

É de conhecimento amplo a importância do nitrogênio na cultura do milho, para a obtenção de altas produtividades entre 8000 e 14000 kg ha⁻¹. Nos sistemas que visam altas produtividades e em cultivos de sequeiro, as recomendações são de 60 a 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura e, em cultivos irrigados, de 120 a 160 kg ha⁻¹ (AMARAL FILHO et al., 2005; GROSS et al., 2006; PAVINATO et al., 2008; SOUZA et al., 2003).

Dados de Pesquisa no Paraguai indicaram que para produtividades de 6000 kg ha⁻¹ de milho, é recomendado aplicar aproximadamente 90 kg ha⁻¹ de N no sistema plantio direto estabilizado e 130 kg ha⁻¹ na fase de estabelecimento. Para produtividades de 8000 kg ha⁻¹ de milho recomenda-se à aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N (WENDLING, 2005).

Resultados de pesquisa no Brasil vêm demonstrando que o potencial produtivo da cultura está relacionado à aplicação de doses de N que variam de 90

kg ha⁻¹ a 180 kg ha⁻¹ de N (GOMES et al., 2007; GROSS et al., 2006; SILVA et al., 2005; VELOSO et al., 2006;).

Os critérios para recomendação de adubação nitrogenada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina são o teor de matéria orgânica do solo, a expectativa de rendimento de grãos de milho e a contribuição da cultura antecedente como fonte de suprimento de N e as doses de recomendação variam de 0 a 200 kg ha⁻¹ de N (AMADO et al., 2002).

De acordo com Bull (1993) e Fontoura et al. (2009) estudos realizados no Brasil demonstraram que as melhores produtividades de grãos de milho estão no rango de 8000 e 14000 kg ha⁻¹ e são obtidos com a aplicação de 30 até 40 kg de N ha⁻¹ na semeadura e de 90 a 120 kg de N ha⁻¹ entre 30 e 45 dias após a germinação em cobertura, entre os estádios V6-V10 (Ritchie et al., 1993), totalizando entre 120 e 160 kg ha⁻¹ de N aplicado.

Indicadores como a absorção de N no tecido têm sido utilizados para monitorar disponibilidade de nitrogênio e auxiliar na decisão sobre a quantidade e época de aplicação deste nutriente que esta embasada na relação existente entre a produtividade de grãos e teor de N na folha (BLACKMER; SCHEPERS, 1994).

Schepers et al., (1995) reportou que menos de 20% do N total é absorvido antes de V8 no desenvolvimento de milho e que fornecer parte do N da adubação nitrogenada depois da semeadura diminui os riscos ambientais de perdas de N. Segundo Blackmer e Schepers (1995), a vantagem de medições de refletância com equipamentos para determinação da intensidade de verde das folhas do milho em relação ao teor de N na folha esta baseada em que é instantânea e não destrutiva, e também não sendo influenciada pelo excesso de adubação nitrogenada.

Segundo García (2009) existe uma variabilidade na resposta do milho de acordo á disponibilidade de N na semeadura, possivelmente devido a fatores como o N da mineralização durante o desenvolvimento do cultivo, perdas de N disponível na semeadura. Scharf et al., (2005) verificou que o clima, solo e manejo afetam a resposta do milho gerando variabilidade espacial e temporal da dose ótima de N necessária para o cultivo.

O N é o nutriente com maiores interações com o ambiente, sendo um elemento de grande importância para a produção vegetal. Existem perdas de N aplicado que geram perdas econômicas e ambientais dependentes de tipo de solo,

clima e manejo do solo e dos fertilizantes, principalmente nitrogenados (CANTARELLA et al., 2007).

Perdas por lixiviação são muito variáveis e dependem da presença de nitrato e do excedente de água que percola pelo perfil do solo e as perdas por desnitrificação dependem das condições aeróbias do solo (ar, temperatura, umidade). Meisinger et al., (1985) afirmaram que a lixiviação representa perdas entre 10% e 30% do N adicionado ao solo e também indicaram que as perdas ocasionadas por desnitrificação em solos, respondem em geral variando de 5% a 25% do nitrogênio adicionado.

Em solos sub-tropicais predominantemente ácidos as perdas por volatilização de amônia estão diretamente ligadas ao uso de fertilizantes onde a principal fonte utilizada é a uréia e se verificaram perdas de 5 a 70% do N aplicado como fertilizante (LARA CABEZAS et al, 2005; CANTARELLA, 2007; MIKKELSEN, 2009).

Existem varias rotas das reações do N no solo e são várias magnitudes de perdas, dependendo das condições ambientais apresentadas em cada região, as quais impactam diretamente na eficiência de uso do fertilizante.

Trabalhos demonstraram no Brasil (COELHO et al., 1991; GAVA, 2003; LARA CABEZAS et al., 2005) que uma quantidade significativa do N aplicado como fertilizante não é encontrada no solo ou nas plantas e esses números variam em torno de 15% a 40 %, dependendo do manejo e condições ambientais, fato que estimula pesquisas regionais na busca de melhorar a eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados.

A eficiência pode expressar a relação entre produção obtida e insumos aplicados; isto significa que a eficiência nutricional é a quantidade de matéria seca ou grãos produzidos por unidade de nutriente aplicado; entretanto, na literatura a eficiência nutricional é definida de várias maneiras.

De acordo com Graham (1984) esta eficiência pode ser definida como a produção relativa de um genótipo em solo deficiente em comparação com sua produção no nível ótimo de nutrientes.

Cooke (1987) define a eficiência nutricional como o aumento de produtividade por unidade de nutriente aplicado.

Fageria (1998) propõe para avaliação da eficiência nutricional em culturas anuais a produção de grãos, a produção de matéria seca e nitrogênio absorvido como parâmetros validos para demonstrar a eficiência nutricional.

Dobermann (2007) relata que eficiência dos nutrientes se podem estudar desde os rendimentos de cultivos, a recuperação do nutriente aplicado em planta, e a extração do nutriente pelo sistema que possibilita fazer um balanço de entrada e saída do nutriente no sistema.

Segundo García (2009) com o estudo da eficiência dos nutrientes ou fertilizantes pode-se definir como as plantas ou os sistemas de produção estão utilizando os nutrientes e de acordo ao tempo podem ser avaliados em curto, mediano e longo prazo.

Snyder e Bruuselma (2007) e Dobermann (2007) estão consolidando em nível mundial suas propostas para caracterizar e descrever a eficiência do uso de nutrientes em cereais, baseados na utilização de cinco índices agronômicos: 1) Eficiência Agronômica (EA, kg aumento de rendimento do cultivo por kg de nutriente aplicado), 2) Eficiência Aparente de Recuperação do Fertilizante (ER, kg do nutriente absorvido por kg do nutriente aplicado), 3) Eficiência fisiológica (EF, kg aumento de rendimento do cultivo por kg de nutriente absorvido), 4) Produtividade Parcial do Fator (PPF, kg do rendimento do cultivo por kg de nutriente aplicado), 5) Balanço Parcial do Nutriente (BPN, kg nutriente removido por kg de nutriente aplicado).

Dobermann (2005) demonstrou fazendo um resumo dos dados de mais de 850 experimentos que foram publicados a nível mundial, que a eficiência de recuperação do nitrogênio de fertilizantes para os cereais situa-se na maioria das vezes entre 50% e 55% do fertilizante aplicado.

Nos países Sul-americanos o alto custo do fertilizante e baixo emprego de subsídios para a produção agrícola tem levado aos técnicos e produtores na procura de obter o melhor benefício econômico, evitando doses em excesso dos fertilizantes, que em muitas vezes corrobora para que não se alcance o potencial em produtividade (MELGAR; DAHER, 2007).

A eficiência de uso de N estudada de acordo com os quilogramas de aumento de rendimento do cultivo por quilogramas de N aplicado demonstram um comportamento inversamente proporcional as doses usadas (GARCIA, 2009).

Na Argentina (RILLO; RICHMOND, 2006) encontraram avaliando experimentos com doses de N em milho valores de PPF entre 55 e 360 kg kg⁻¹ e resultados de EA entre 30 e 60 kg kg⁻¹.

No Brasil foram encontradas taxas de recuperação de N em milho em estudos a campo variáveis que incluem valores como 30 % (LARA CABEZAS et al., 2000), e entre 44% e 55% (COELHO et al., 1991; SILVA et al., 2000).

Estatísticas sobre produtividade e eficiência agrônômica entre países produtores de milho foram realizados para fins comparativos (MELGAR; DAHER, 2007). Os Estados Unidos apresenta a melhor produtividade média de milho com $9,15 \text{ t ha}^{-1}$, uma dose média de N aplicado de 157 kg ha^{-1} e uma PPF de $58,4 \text{ kg grãos kg}^{-1}\text{N}$. França apresenta a segunda melhor produtividade de milho com $8,3 \text{ t ha}^{-1}$, dose média de N aplicado de 163 kg ha^{-1} e uma PPF de $58,4 \text{ kg grãos kg}^{-1}\text{N}$. A pior produtividade média de milho entre os países comparados foi a de China com 5 ton ha^{-1} , dose média de N aplicado máxima de 198 kg há^{-1} e a mais baixa PPF de $26,1 \text{ kg grãos kg}^{-1}\text{N}$.

Argentina e Brasil apresentaram os maiores PPF $123,4 \text{ 1 kg grãos kg}^{-1}\text{N}$ e $101,6 \text{ 1 kg grãos kg}^{-1}\text{N}$ respectivamente, sendo suas produtividades média de $7,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $4,9 \text{ t ha}^{-1}$ com doses média de N aplicado de 58 kg ha^{-1} e 48 kg ha^{-1} (MELGAR; DAHER, 2007). García (2009) reporta que em muitas ocasiões as altas eficiências de uso e recuperação de N na região é devido à dose aplicada de N ser subótima.

Um avanço importante foram os valores obtidos na experimentação e publicados por Snyder e Bruuselma (2007) e Dobermann (2007), que são utilizados como níveis de referência para discussão no cálculo dos índices agrônômicos na estimativa da eficiência de uso de nitrogênio no milho. Para EAN os valores comumente encontrados variam entre $10\text{-}30 \text{ kg kg}^{-1}$ de N; para ERN os valores encontrados são 30 a 50% do N aplicado, para EF $30\text{-}90 \text{ kg kg}^{-1}$ de N, para PPF entre $40\text{-}80 \text{ kg kg}^{-1}$ de N e para BPN resultados menores a 1 indicam sistemas deficientes e maiores a 1 indicam sistemas supridos do nutriente.

Segundo García (2009), os valores de PPF e BPN estão fortemente afetados pelo fornecimento de nutrientes do solo e são parâmetros que consideram rendimento de grãos e a remoção total do nutriente, mas são de utilidade para avaliar a eficiência de uso de nutrientes em nível global. Também com a PPF e BPN podem-se fazer estimativas a partir de estatísticas regionais ou localizadas, permitindo determinar à eficiência de nutriente a maior escala, por exemplo, cidade, país, continente, etc.

Por outra parte, os índices EAN, ERN e EFN, requerem de avaliações e estudos específicos de experimentos de campo onde é necessário ter uma

testemunha com dose zero do nutriente para calcular os parâmetros surgidos das doses aplicadas (GARCÍA, 2009).

Os fatores considerados na otimização do uso do nitrogênio, como dose certa, momento correto, local adequado, além da ação de outros fatores, devem ser avaliados e investigados regionalmente, de modo a reduzir perdas e obter melhoradas praticas para o uso de fertilizantes (FIXEN, 2010).

2.2 Manejo localizado de N em cultivos com utilização de sensores óticos ativos.

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica para obter informações sobre objetos através de dados coletados por instrumentos que não estejam em contato físico com os objetos investigados, porem são medições por sinais que evitam destruição dos objetos avaliados (MENESES, 2001).

A informação é adquirida pela detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo ao seu redor e este sinal pode incluir um campo eletromagnético emitido e/ou refletido, ondas acústicas refletidas e/ou perturbadas pelo objeto ou as perturbações do campo de gravidade ou potencial magnético com a presença do objeto. Geralmente a aquisição de informações é baseada na captação dos sinais eletromagnéticos que cobrem o espectro inteiro das ondas eletromagnéticas desde a onda longa de rádio, passando pelas microondas, submilímetro, infravermelho termal, médio e próximo, visível, ultravioleta, raios X até os raios gama (LIU, 2006).

Atualmente os vegetais podem ser monitorados com técnicas de reflectância no sensoriamento remoto, atuando como forma de identificar a curva de acúmulo de biomassa das culturas ao longo do seu ciclo. Vários estudos indicam que o estado nutricional das plantas e o rendimento de grãos estão relacionados à reflectância espectral da vegetação e podem ser quantificados através de índices de vegetação (GROHS, et al., 2009; LABUS et al., 2002; MELCHIORI, 2010; POVH et al., 2008). Índices de vegetação podem ser obtidos através de diferentes fórmulas, as quais são baseadas na diferença de resposta espectral apresentada pela vegetação nas bandas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP). O comprimento de onda na

faixa espectral do vermelho é absorvido pelas clorofilas, tornando os valores de reflectância decrescentes à medida que aumentam os teores de clorofila. Já no infravermelho próximo, os valores de reflectância aumentam com o aumento da biomassa da parte aérea. A relação entre a quantidade de radiação absorvida e refletida pelo dossel e pelo solo determina a reflectância, a qual é associada à quantidade de biomassa e ao teor de clorofila presente.

O índice de vegetação mais utilizado em pesquisas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e esta representada pela equação proposta por Rouse et al. (1973):

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{r}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{r}}),$$

Onde: ρ_{nir} e ρ_{r} são as reflectâncias no infravermelho próximo e no visível, respectivamente para fins de quantificação do crescimento da vegetação e varia numericamente de -1 a +1.

Liu (2006) explicou que os valores NDVI negativos representam as nuvens, ao redor de zero indicam a presença de solo sem cobertura vegetal, e quando aumenta positivamente o valor NDVI proporcionalmente aumenta o vigor da vegetação.

Mallarino (1999) reportou que uma alternativa promissória para manejo localizado de fertilizantes é a denominada amostragem dirigida ou amostragem por zona de manejo. O conceito de zona de manejo define sub-regiões com combinações relativamente homogêneas de fatores de rendimento que podem ser manejados com uma única proporção de insumos. Os atributos e métodos utilizados para delimitação das zonas de manejo são variados e podem ser a topografia, atributos ligados à dinâmica do solo e água, mapas de rendimento de grãos, e uma atividade com futuro podem ser a utilização de sensores remotos para o manejo localizado do N (SCHEPERS et al., 2000).

Clay et al. (2006) realizaram um estudo que comparou a recomendação de N com base no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e no histórico de produtividade do milho, com leituras feitas nos estádios V8 e V9, onde o uso do NDVI foi mais acurado que aplicações baseadas somente na produtividade.

As medições de reflectância com sensores foi adaptada para uso em nível terrestre. Um dos sensores desenvolvidos foi o sensor Greenseeker (NTECH

INDUSTRIES). Este aparelho utiliza diodos de emissão de radiação nas faixas do vermelho (650 nm) e infravermelho próximo (770 nm). A leitura de reflectância é calculada por um microprocessador interno, fornecendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é transmitido a um computador portátil adaptado ao sensor. A principal vantagem deste equipamento é a possibilidade de realizar um grande número de amostragens não destrutivas e rápidas, admitindo a leitura em tempo real em diversos pontos da lavoura, em alta resolução espacial, permitindo a observação da variabilidade.

Estes conhecimentos foram desenvolvidos por pesquisadores da Universidade de Oklahoma (USA) pelo método denominado Sensor Based Nitrogen Rate Calculator (SBNRC) e com esta metodologia estão sendo regionalizadas e calibradas curvas de respostas em vários cultivos e países com a utilização do sensor comercial Greenseeker, como instrumento de medição NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (RAUN et al., 2001, 2002, 2005).

Raun (2005) em USA e Melchiori (2010) na Argentina propõem o uso de sensores ópticos para o manejo sitio específico de N, sendo as leituras NDVI uma alternativa para diminuir a variabilidade espacial da disponibilidade de N no milho, sendo chave para sua utilização na agricultura a regionalização e criação de algoritmos de recomendações de adubações de N e ajustar metodologias baseados em correlações com análises vegetais como ferramenta de diagnóstico da deficiência de N no cultivo.

Uma forma típica de gerar algoritmos de recomendações de N com o uso de sensores ópticos é gerando no campo uma zona não limitante de N para a cultura (N ótimo) e outras zonas deficientes sob níveis crescentes de N (N alvo) para gerar algoritmos comparando o cultivo com o N limitante e não limitante (KITCHEN et al., 2010; RAUN, 2005;. SOLARI et al., 2008;. SRIPADA et al., 2008).

Dados de experimentos em milho e trigo conduzidos com base em modelos de recomendação de doses de N usando leituras do NDVI têm demonstrado redução em torno de 15% no uso de fertilizantes nitrogenados, comparativamente às áreas conduzidas com aplicação uniforme de N (RAUN et al., 2002, 2004, 2005).

Trabalhos de Povh et al. (2008) na ESALQ/USP avaliaram relações feitas pelas leituras do sensor óptico ativo com doses de N, concentração de N nas folhas, produção de matéria seca e produtividade de grãos, demonstraram alto potencial

para manejo do N nas culturas do trigo, triticale e cevada, e baixa resposta no milho com as leituras NDVI feitas.

O uso desses sensores e sua relação com o comportamento do milho na adubação em cobertura mais tardia (estádio V10 até V14) que o normalmente realizado pelo produtor (estádio V6-V8) vêm sendo avaliados demonstrando boa relação entre a nutrição de N no desenvolvimento do milho e o NDVI obtido pelo sensor óptico (RAUN et al., 2005) uma boa previsão de rendimento de grãos com leituras NDVI (TEAL et al., 2006); também uma correlação alta com a biomassa acumulada em estádios superiores entre V8 e V12 (MARTIN et al., 2007; SOLARI et al., 2008) e com o nitrogênio absorvido (FREEMAN et al., 2007), além de baixar a variabilidade (CV) nas leituras NDVI com o aumento da biomassa acumulada e doses de N aplicado. Assim, também há uma integração entre NDVI com a altura, distanciamento e variabilidade entre plantas de milho (MARTIN, et al., 2012).

No Brasil, trabalhos na UFRGS realizados por Grohs et al., (2009) encontraram que a medição do NDVI é um eficiente estimador do rendimento de grãos e propuseram um modelo para estimar classes do potencial produtivo, baseados na relação entre leituras de NDVI e da biomassa seca acumulada na parte aérea em cultivares de trigo e de cevada, por ocasião da emissão da sexta folha do colmo principal. As classes de potencial produtivo baixo, médio, alto e muito alto para trigo e cevada foram indicadas, respectivamente, pelos seguintes valores de NDVI: 0,13, 0,45, 0,68 e 0,80, sob palhada de milho, e 0,33, 0,59, 0,75 e 0,83, sob palhada de soja.

Segundo Bredemeier (2011) a medição de variáveis do dossel durante o desenvolvimento da cultura, como o NDVI, é uma oportunidade para melhorar o rendimento e a qualidade de grãos, através da aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados. Variáveis importantes neste contexto são a área foliar, a biomassa total e os teores de clorofila e nitrogênio na massa seca, as quais são indicadores da necessidade de N pelas culturas. As variações espaciais e temporais destas variáveis devem ser determinadas, de maneira que a quantidade de N aplicada em cobertura corresponda às exigências da cultura tanto quanto possível.

2.3 Referencias Bibliográficas

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.2, p.241-248, 2002.

AMARAL FILHO, J. P. R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J. C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 467-473, 2005.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 24, n. 4, p. 905-915, 2000.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, n.9/10, p.1791-1800, 1994.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.8, p.56-60, 1995.

BREDEMEIER, C. Como melhorar a eficiência de uso do nitrogênio em cereais de estação fria. In: CASTRO A. et al.,(Org). **Limitaciones para la productividad de trigo y cevada**. Montevideo, Uruguay. 2011. p. 69-81.

BÜLL, L.T. **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, POTAFOS, 1993. p.148-196.

CAPECO – **Cámara Paraguaya de Exportadores de Cereales y Oleaginosas**. 2011. Disponível em: <www.capeco.org.py>. Acesso em: 3 nov. 2011.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Eds). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba : POTAFOS, 1993. p.147-198.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CIAMPITTI I.; GARCÍA. F. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios: Cereales, Oleaginosos e Industriales. **Informaciones Agronómicas No. 33**. Archivo Agronómico No. 11. pp. 1-4. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 2007.

CLAY, D.E.; KIM, K.I.; CHANG, J.; CLAY, S.A.; DALSTED, K. Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. **Agronomy Journal**, v.98, p.579-587, 2006.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio (15N) em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v. 15, n. 2, p.187-193, 1991.

COOKE, G.W. Maximizing fertilizer efficiency by overcoming constraints to crop growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.10, p.1357-1369, 1987.

DOBERMANN, A. **Nitrogen use efficiency**: state of the art. Proc. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertiliser. Frankfurt, Germany. p. 1-16. 2005.

DOBERMANN A. **Nutrient Use Efficiency – Measurement and management**. IFA International Workshop on fertilizer best management practices. 7-9 Marzo, Bruselas, Bélgica. 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; RIZZARDI, M.A.; ARGENTA, G. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.71-77, 1997.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.1, p.6-16, 1998.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Cultura do milho: aspectos fisiológicos e manejo da água. **Informações Agronômicas**, v.73, p.1-4,1996.

FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 4, n. 2, p. 195-204, 2005.

FIXEN P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. IN: Prochnow, L.I.; CASARIN,V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 1-22.

FONTOURA, S.M.V. & BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, 33:1721-1732, 2009.

GARCÍA F. **Eficiencia de uso de nutrientes y mejores prácticas de manejo para la nutrición de cultivos**. p. 9-19. In: Simposio Fertilidad 2009. Acasuso. International Plant Nutrition Institute. p.250. 2009

GAVA, G.J.C. **Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho**. 2003. 125f. (Tese de Doutorado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GOMES, R. F.; SILVA, A. G. da; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R. Efeito de doses e época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agronômicos da cultura do milho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 931-938, 2007.

GRAHAM, R.D. **Breeding for nutritional characteristics in cereals**. In: TINKER, P.B.; LAUCHI, A., ed. *Advances in plant nutrition*. New York: Praeger, 1984. p.57-102.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.101-112, 2009.

GROSS, M. R.; VON PINHO, R. G.; BRITO, A. H. Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamento entre fileiras na cultura do milho em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 3, p. 387-393, 2006.

KITCHEN, N.R., K.A. SUDDUTH, S.T. DRUMMOND, P.C.SCHARF, H.L. PALM, D.F. ROBERTS, AND E.D. VORIES. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**. 102:71-84. 2010.

LABUS, M.P.; NIELSEN, G.A.; LAWRENCE, R.L.; ENGEL, R.; LONG, D.S. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.23 n.20, p.4169-4180, 2002.

LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.215- 226, 2005.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KONDÖRFER, G.H. & PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 14:363-376, 2000.

LIU, W.T.H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Editora Uniderp, 2006. 908 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1976. 528p.

MALLARINO, A. P. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 1, n. 1. p. 15-25, 1999.

MEISINGER, J.J.; BANDEL, V.A.; STANFORD, G. & LEGG, J.O. Nitrogen utilization of maize under minimal tillage and moldboard plow tillage: I Four-year results using labeled N fertilizer on Atlantic coastal plain soil. **Agronomy Journal**., 77:602-611, 1985.

MELCHIORI, R.J.M. Sensores remotos para el manejo del nitrógeno. In: **Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas**, 9., 2010, Manfredi. Anais Córdoba: INTA, 2010. p 215-220.

MELGAR, R.; DAHER, E. Fertilizer Best management practices in South America agricultural systems, In: **International Fertilizer Industry Association Fertilizer best management practices**. Paris, 2007. p. 153-162

MELGAR, R. **Fertilización en el Corn Belt**. Es tan diferente de lo que hacemos aqui? Fertilizar No 5, p 21-31, Octubre 2006, Buenos Aires, Argentina. 2006.

MENESES, P. R. **Fundamentos de Radiometria Óptica Espectral**. In: MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados. 2001.

MIKKELSEN, R. Ammonia emissions from agricultural operations: fertilizer. **Better Crops**, v.93, n.4, p.9-11, 2009.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTO, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P. ; GIMENEZ, L.M. ; PAULETTI, V.; MOLIN, R. ; SALVI, J.V.. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. Pesquisa Agropecuária Brasileira , v. 43 , p. 1075-1083, 2008.

RANDALL, G.W., J.A. VETSCH, AND J.R. HUFFMAN. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrapyrin. *Agronomy Journal* 95:1213-1219. 2003.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 36, 2759-2781. 2005.

RAUN, W.R., G.V. JOHNSON, M.L. STONE, J.B. SOLIE, E.V. LUKINA, W.E. THOMASON AND J.S. SCHEPERS. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**. 93:131-138. 2001.

RAUN, W.R., J.B. SOLIE, G.V. JOHNSON, M.L. STONE, R.W. MULLEN, K.W. FREEMAN, W.E. THOMASON, AND E.V. LUKINA. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**. 94:815-820. 2002.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames : Iowa University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1993. 21p. (Special Report, 48).

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: **NASA ERTS Symposium**, v.3, p.309-317, 1973.

SÁ, J.C.M. **Manejo do nitrogênio na cultura do milho no sistema plantio direto**. Passo Fundo, RS : Aldeia Norte, 1996. 24p.

SCHARF, P.C; WIEBOLD; LOHRY, J. A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. **Agronomy Journal**. 94:435-441. 2002

SCHARF, P.C., N.R. KITCHEN, K.A. SUDDUTH, J.G. DAVIS, V.C. HUBBARD AND J.A. LORY. Field-scale variability in optimal N fertilizer rate for corn. **Agronomy Journal**. 97:452–461. 2005.

SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; WATTS, D.G. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. **Journal of Contaminant Hydrology**. Amsterdam, v.20, p. 227-239, 1995.

SCHEPERS, J. S.; SHANAHAN, J. F.; LUCHIARI JUNIOR, A. **Precision Agriculture as a tool for sustainability**. In: GALANTE, E.; SCHEPERS, J. S.; WERNER, D.; WERRY, P. A. T. J. (Eds.). *Biological Resource Management: Connecting Science and Policy*. INRA Editions-Springer, 2000. p.129- 138.

SOLARI, F., J. SHANAHAN, R. FERGUSON, J. SCHEPERS, AND A. GITELSON. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**. 100:571-579. 2008.

SRIPADA, R.P., J.P. SCHMIDT, A.E. DELLINGER, AND D.B. BEEGLE. Evaluating multiple indices from a canopy reflectance sensor to estimate corn N requirements. **Agronomy Journal**. 100:1553-1561. 2008.

SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; ALVES SOBRINHO, T.; FEDATTO, E.; ZANON, G. D.; HASEGAWA, E. K. B. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade de milho em plantio direto irrigado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 3, p. 55-62, 2003.

SILVA, E. C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G. L.; LAZARINI, E.; SÁ, M. E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 353-362, 2005.

SNYDER C.S.; T.W. BRUULSEMA. 2007. **Nutrient use efficiency and effectiveness in North America**: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. IPNI. Junio 2007.

TEAL, R.K., B. TUBANA, K. GIRMA, K.W. FREEMAN, D.B. ARNALL, O. WALSH, AND W.R. RAUN. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**. 98:1488–1494. 2006.

UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen deficiency in maize.I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. **Crop Science**, v.35, p.1376-1383, 1995.

USDA. **World Agricultural Production**. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Circular Series WAP October 2011.

VELOSO, M. E. C.; DUARTE, S. N.; DOURADO NETO, D.; MIRANDA, J. H.; SILVA, E. C.; SOUSA, V. F. Doses de nitrogênio na cultura do milho, em solos de várzea, sob sistema de drenagem subterrânea. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 5, n. 3, p. 382-394, 2006.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres/POTAFOS, 1991. 343 p.

3 HIPÓTESES

As condições climáticas afetam nos valores dos índices agronômicos que determinam a eficiência do uso do nitrogênio em milho.

A adubação nitrogenada da cultura do milho pode ser aprimorada pela capacidade do sensor óptico de estimar o estado nutricional das plantas de milho.

O parcelamento da adubação nitrogenada apresenta melhoria na eficiência do uso do nitrogênio no milho na comparação com a adubação integral nitrogenada em semeadura ou cobertura.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Verificar o estado nutricional do milho estimado com índices agronômicos e com espectroscopia óptica em função da fertilização nitrogenada no Paraguai.

4.2 Objetivos específicos

Utilização de índices agronômicos para estimar a eficiência do uso de nitrogênio no milho na região Sul de Paraguai.

Determinar a relação dos valores NDVI determinado pelo sensor óptico com a biomassa acumulada na parte aérea, o nitrogênio absorvido e a produtividade do milho em função do nitrogênio aplicado.

Obter dados sobre EUN com combinações parceladas de adubação de N em semeadura e cobertura visando uso de espectroscopia óptica.

5 ARTIGO 1: ATRIBUTOS FITOTÉCNICOS E EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NITROGÊNIO PELO MILHO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGÊNADA NO PARAGUAI

5.1 Resumo

Identificar melhores práticas para aumentar a eficiência do uso de nitrogênio (EUN), é indicado estudá-la com a utilização de cinco índices agronômicos como modelo para caracterizar os sistemas de produção quanto ao uso de N da adubação, com a obtenção de uma classificação de referência validada a cada condição edafoclimática, tecnológica e sistema de produção. O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de índices agronômicos para estimar a EUN no milho e a resposta em produtividade na região Sul do Paraguai. Estimou-se a quantidade absorvida de N, aplicado em semeadura com doses variando de 0 até 180 kg de N em dois anos consecutivos (2010 e 2011). Com os dados de produtividade, matéria seca e N absorvido obtidos, realizaram-se os cálculos dos índices agronômicos: eficiência agronômica do uso de N (EAN), eficiência aparente da recuperação de N (ERN), eficiência fisiológica do N (EFN), produtividade parcial do fator (PPF) e balanço parcial do nutriente (BPN). A EUN baseada no rendimento de grãos demonstraram valores decrescentes de PPF e de EAN em função do aumento da dose de N aplicado. Os índices BPN, ERN e EFN que avaliaram a capacidade de recuperação do N pelo milho demonstraram, na dose 180 kg ha⁻¹ de N para 2010 e na dose 60 kg ha⁻¹ de N para 2011, uma melhoria na EUN, com um BPN equilibrado e alta recuperação do N nos ambientes de produção.

Palavras-chave: *Zea mays*, nitrogênio, plantio direto.

PHYTOTECHNICAL PARAMETERS AND AGRONOMIC EFFICIENCY OF CORN PERFORMANCE AS A FUNCTION OF NITROGEN IN PARAGUAY

5.2 Abstract

Identify best practices to improve the nitrogen use efficiency, it is indicated to study it by using five agronomic indices as model to characterize how the production systems that are using the N fertilization with obtaining a classification reference validated to each edaphoclimatic, technological and production system condition. The objective of this study was to evaluate the use of indices to estimate agronomic nitrogen use efficiency in maize productivity and response in southern Paraguay. It was estimated the amount of N absorbed by applying pre-planting with doses ranging from 0 to 180 kg N in two consecutive years (2010 and 2011). With productivity data, it dry matter and N uptake obtained for each plot, the calculations were performed agronomic indices: agronomic efficiency of N use, apparent efficiency of N recovery, physiological efficiency of N, partial factor productivity and partial balance of the nutrient. The nitrogen use efficiency based on grain yield showed decreasing values of partial factor productivity and agronomic efficiency of N use due to the increase of N applied. The partial balance of the nutrient, apparent efficiency of N recovery and physiological efficiency of N rates, that evaluated the ability of N recovery by corn showed, at 180 kg N ha⁻¹ for 2010 and at a dose 60 kg N ha⁻¹ for 2011, an improvement in nitrogen use efficiency, with a balanced assessment and high N recovery in production environments.

Keywords: *Zea mays*, nitrogen, no tillage.

5.3 Introdução

O principal mecanismo de suprimento de nitrogênio (N) é por fluxo de massa indicando que a água é fundamental para que haja resposta ao nutriente e para que ele seja adequadamente absorvido pelos vegetais (MALAVOLTA, 2006). O Nitrogênio é o nutriente de difícil predição e complexas interações com o ambiente, sendo um elemento de grande importância para a produção de milho (CANTARELLA et al.; 2010).

Os países sul-americanos possuem médias baixas de adubação nitrogenada no milho, que variam entre 40 e 60 kg ha⁻¹ de N, isto pode explicar sua menor produtividade ao compará-los com os países de maior produtividade de milho (MELGAR, 2006).

Entre os fatores responsáveis pela melhoria da produtividade da cultura do milho nos últimos anos está o aumento expressivo do uso dos fertilizantes nitrogenados. Segundo Escosteguy et al. (1997) e Uhart e Andrade (1995), o N determina o desenvolvimento das plantas de milho, com aumento significativo na área foliar e na produção de matéria seca, resultando em maior produtividade de grãos.

Atualmente, muitas pesquisas em nível mundial concentram-se a respeito das quantidades de N aplicadas à cultura do milho, sua eficiência na absorção e as respostas que geram na produtividade (GARCÍA, 2009). Existem perdas de N aplicado, que geram prejuízos econômicas e ambientais, dependentes do tipo de solo, clima e manejo do solo e dos fertilizantes (CANTARELLA et al.; 2011).

Pesquisas sobre a eficiência de uso de N (EUN) demonstraram que para os principais cereais, incluindo o milho, é de aproximadamente 33% com oscilações de médias entre 29% e 42% dependendo da tecnologia de aplicação e fonte utilizada (RAUN; JOHNSON, 1999).

No Brasil, as pesquisas demonstraram que uma quantidade significativa do N aplicado como fertilizante não é encontrada no solo ou nas plantas. Tais números variam em torno de 15% a 40 %, dependendo do manejo e condições ambientais (COELHO et al., 1991; GAVA et al., 2002; LARA CABEZAS et al, 2005). Nos sistemas que visam altas produtividades e em cultivos de sequeiro, as recomendações são de 60 a 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura e, em cultivos irrigados,

de 120 a 160 kg ha⁻¹ (AMARAL FILHO et al., 2005; GROSS et al., 2006; PAVINATO et al., 2008; SOUZA et al., 2003).

Cooke (1987) definiu a eficiência do uso do N (EUN) como o aumento de produtividade por unidade de N aplicado. Dobermann (2005) demonstrou fazendo um resumo dos dados de mais de 850 experimentos, que na adubação a eficiência de recuperação do nitrogênio (ERN) para os cereais situa-se na maioria das vezes entre 50% e 55% do fertilizante aplicado. Raun (2005), Dobermann (2007), e García (2009) concordam que a EUN podem-se estudar desde os valores de rendimentos de cultivos, a recuperação do nutriente aplicado em planta, e a extração do nutriente pelo sistema que possibilita fazer um balanço de entrada e saída do nutriente no sistema.

Snyder e Bruuselma (2007), Dobermann (2007) e García (2009) visando melhores praticas para aumentar a EUN propõem avaliar a EUN com a utilização de cinco índices agronômicos como modelo para caracterizar os sistemas de produção de grãos e a utilização do N da adubação, visando melhorar a EUN com a obtenção de pontos de referência validados a cada condição edafoclimática e tecnológica. O objetivo deste trabalho é a utilização de índices agronômicos para estimar a eficiência do uso de N no milho na região Sul de Paraguai.

5.4 Material e Métodos

5.4.1 Localização e caracterização edafoclimática da região de estudo

Este estudo foi realizado na Região Oriental, ao sul de Paraguai. Possui um clima classificado segundo Köppen (1931) como Cfa, subtropical úmido, mesotérmico, com verões quentes e invernos com geadas ocasionais. A precipitação média anual varia entre 1300 a 1900 mm, com chuvas distribuídas durante o ano, e ocorrência de períodos de estiagem nos meses de julho e agosto, e temperatura média mensal de 17 a 27 °C. Os experimentos foram compostos por doses variáveis de N na cultura do milho, montados no mesmo local por dois anos agrícolas Experimento (2010 e 2011).

Os trabalhos a campo foram no município de Alto Verá, Departamento de Itapúa, na área de um produtor da cooperativa Colônias Unidas. O solo do experimento é classificado como Latossolo Vermelho, com textura franco argilosa (EMBRAPA, 2006). Na Tabela 1 são apresentadas as características granulométricas e químicas dos solos, determinadas na implantação dos experimentos conforme procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995).

Tabela 1. Caracterização da fertilidade do solo antes da instalação do experimento, na camada 0-0,10 m de profundidade, Alto Verá, Itapúa, Paraguai.

Local	Argila ¹	MOS ²	pH água ³	P ⁴	K ⁴	Ca ⁵	Mg ⁵	Al ⁵	CTC
	-----g kg ⁻¹ -----			mg dm ⁻³		-----cmol _c L ⁻¹ -----			
Itapúa	441	33	5,7	6,09	0,12	4,54	1,32	0	9,9

¹Determinada por densímetria; ² Matéria Orgânica do Solo-determinada pelo método Walkley-Black; ³determinado por potenciometria, ⁴determinado pela solução Mehlich-1; ⁵determinados por extração com KCl (1 mol L⁻¹).

Os experimentos não irrigados registraram durante o ciclo da cultura do milho no ano de 2010 alta frequência de precipitação com 358,5 mm a partir dos 55 dias após a semeadura (DAS) até a maturação fisiológica e no ano de 2011, foi verificado déficit hídrico no final dos estádios vegetativos, desde os 55 DAS até a maturação fisiológica (141 mm) agravando-se com a baixa frequência de ocorrência de precipitação (Figura 1).

5.4.2 Delineamentos, unidades experimentais e tratamentos.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com três repetições. As dimensões das parcelas experimentais foram de 10 m x 5 m para todos os tratamentos. Os tratamentos para o Experimento 2010 e 2011 foram de

diferentes doses de N, aplicadas ao lanço na semeadura (0, 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), na forma de uréia.

Nos experimentos as variáveis em estudo foram as doses N ao lanço, desta forma, todos os tratamentos receberam a mesma adubação de K₂O e P₂O₅ (Tabela 2), na linha durante a semeadura.

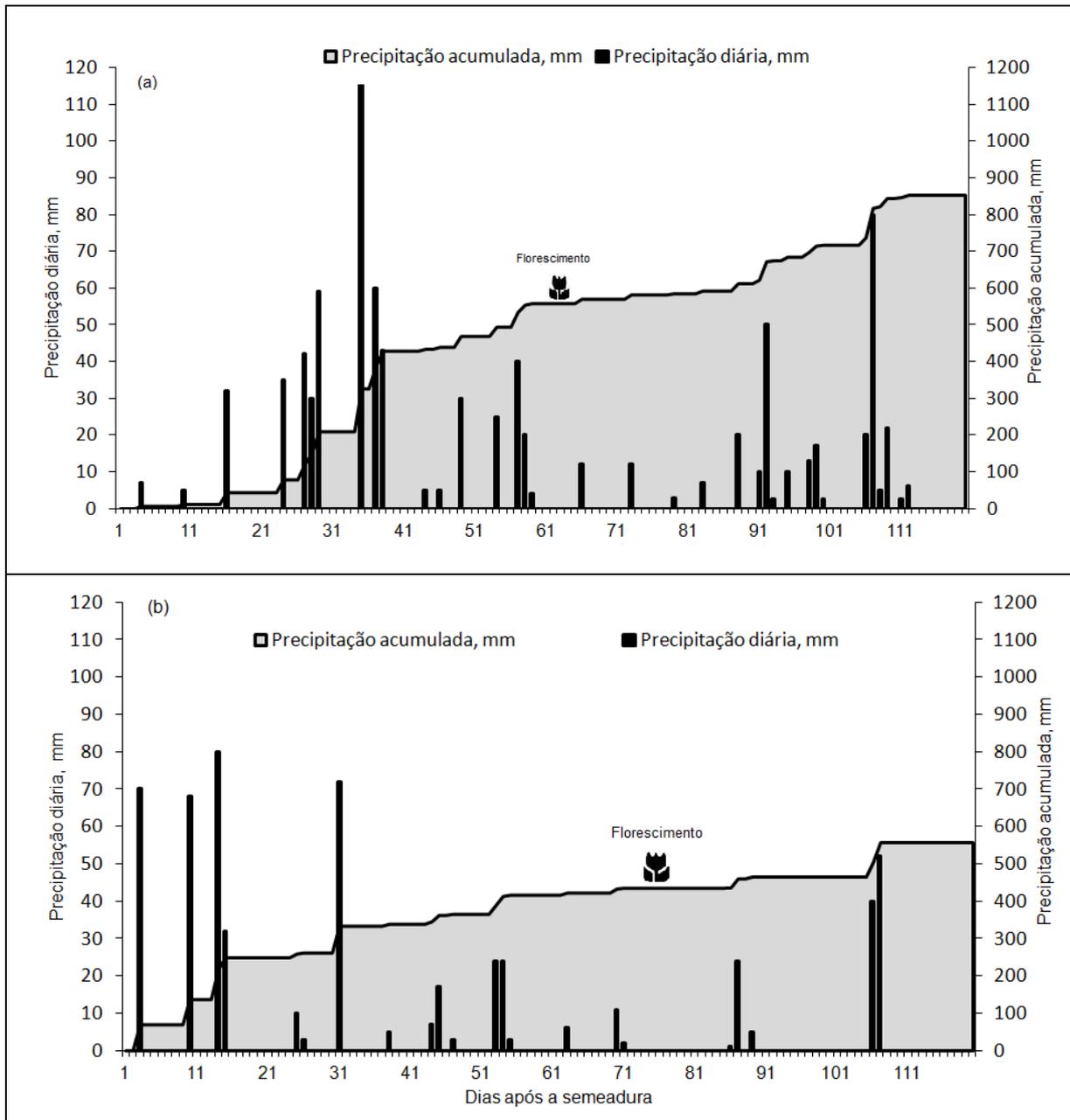


Figura 1 - Representação das precipitações diárias e acumuladas ocorridas nos experimentos durante o ciclo da cultura do milho na safra 2010 (a) e na safra 2011 (b) Alto Verá, Paraguai

5.4.3 Características, condução e avaliações feitas nos experimentos.

Na Tabela 2 apresentam-se as características gerais sobre os experimentos realizados.

Tabela 2 - Descrição das características dos Experimentos conduzidos em Alto Verá, Paraguai.

Características	Experimento 2010	Experimento 2011
Coordenadas	S 26°42'43.20"	S 26°42'43.20"
	W 55°44'45.6"	W 55°44'45.6"
Altitude (m)	310	310
Histórico <u>SPD</u> (anos)	12	13
Híbrido Semeado	DKB 390 <u>SSP</u>	DKB 390 <u>SSP</u>
Cultura Antecessora	Trigo	Trigo
Data de Semeadura	06/11/2010	29/09/2011
Data de Colheita	29/03/2011	16/02/2012
Fertilização Fosfatada (kg ha ⁻¹)	90	90
Fertilização Potássica (kg ha ⁻¹)	60	60
Espaçamento (m)	0,70	0,70
Stand Final (Plantas ha ⁻¹)	59000	55000

SPD: Sistema Plantio Direto; SSP: Simples Semi-Precoce

Para determinar o N absorvido, no estágio de florescimento do milho, coletaram-se dentro de cada parcela, cinco plantas de milho para avaliação da massa de matéria seca, que foi determinada secando-se as plantas em estufa a 65°C até peso constante. O teor de N no tecido da parte aérea do milho foi obtido digerindo-se 0,2 g de matéria seca, com H₂SO₄ e mistura de digestão (Na₂SO₄, CuSO₄.5H₂O) seguida de destilação de arraste de vapor semi-micro Kjeldahl, segundo Tedesco et al. (1995).

A produtividade de grãos de milho foi avaliada colhendo-se manualmente as quatro linhas centrais de cada parcela, descartando-se 0,5 m de cada extremidade, perfazendo uma área total de 16 m², tendo-se corrigido a umidade para 14%.

Com os dados de produtividade, matéria seca e o N absorvido obtidos para cada parcela, realizaram-se os cálculos dos índices agrônômicos, adaptando a

metodologia proposta por Snyder e Bruuselma (2007) e Dobermann (2007) que permitem calcular de acordo com a dose de N aplicado a eficiência agrônômica do uso de N (EAN - kg aumento da produtividade do cultivo/kg de nutriente aplicado), eficiência aparente da recuperação de N (ERN - kg do nutriente absorvido/kg do nutriente aplicado), eficiência fisiológica do N (EFN - kg aumento da produtividade do cultivo/kg de nutriente absorvido), produtividade parcial do fator (PPF - kg da produtividade do cultivo/kg de nutriente aplicado) e o balanço parcial do nutriente (BPN - kg nutriente removido/kg de nutriente aplicado) apresentadas nas equações 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente. Assim também foi calculado o benefício econômico da adubação de milho com N (equação 6).

- Eficiência Agrônômica do Uso do N (EAN)
- (Eq.1) $EAN = (Y_N - Y_0) / X_N$
kg aumento produtividade do cultivo / kg de nutriente aplicado
- Eficiência Aparente de Recuperação do N (ERN)
- (Eq.2) $ERN = (AX_N - AX_0) / X_N$
kg do nutriente absorvido / kg do nutriente aplicado
- Eficiência fisiológica do N (EFN)
- (Eq.3) $EFN = (Y_N - Y_0) / (AX_N - AX_0)$
kg aumento da produtividade do cultivo / kg de nutriente absorvido.
- Produtividade Parcial do Fator (PPF)
- (Eq.4) $PPF = (Y_N / X_N)$
kg da produtividade do cultivo / kg de nutriente aplicado
- Balanço Parcial do N (BPN)
- (Eq.5) $BPN = C_N / X_N$
kg nutriente removido / kg de nutriente aplicado
- Benefício Econômico do N
- (Eq.6) $BEN = P_M (Y_N - Y_0) - (X_N P_N)$
Economia com uso de N – custo da adubação de N

Onde=

Y_N = produtividade de grãos na dose de N

Y_0 = produtividade de grãos sem N

X_N = quantidade de N aplicado

AX_N = quantidade de N absorvido pelo milho no florescimento

AX_0 = quantidade de N absorvido pelo milho no florescimento

C_N = quantidade de N extraído pela colheita de grãos

P_N = Preço comercial do kg do nitrogênio aplicado

P_M = Preço comercial do kg do milho

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo programa SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2010) utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade e para análise de regressão foi utilizado o software JMP IN® Version 3.2.1 (SALL et al., 2005), utilizando o teste F a 5% de significância.

5.5 Resultados e Discussão

Devido à ocorrência de ótimas precipitações (852 mm) no experimento 2010, e a diminuição significativa das precipitações (559 mm) para o experimento 2011, ocorreram respostas diferenciadas na EAN. Ao comparar com a média de precipitações (SCHMIDT, 2009) nas épocas experimentais (631 mm e 744 mm) existiu um incremento de 35% (+221 mm) em 2010 e uma diminuição de 25 % (-185 mm) para o ano de 2011, segundo a média normal de precipitações.

Na Tabela 3, apresentam se resultados do experimento com as doses de N em semeadura e as interações significativas, baseados nos índices agrônômicos que visam definir a eficiência do uso dos nutrientes adaptados das propostas de Dobermann (2007) e Snyder & Bruulsema (2007).

5.5.1 Rendimento de grãos e o N absorvido em função das doses de N.

Nos experimentos com a dose 0 kg ha⁻¹ de N (testemunha) verificou-se um rendimento de grãos de 8.476 kg ha⁻¹ e N absorvido de 132 kg ha⁻¹ no experimento 2010 e de 3.179 kg ha⁻¹ com 72 kg ha⁻¹ de N absorvido experimento 2011 (Figura 2). O rendimento obtido sem N aplicado experimento 2010 foi quase o dobro comparada a média de produção do Paraguai de 4.746 kg ha⁻¹ (CAPECO, 2011).

Tabela 3 – Índices agronômicos gerados da resposta do milho a doses de N em cobertura sob nitrogênio em semeadura. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.

Doses de N	N		EAN ¹	PPF ²	EFN ³	ERN ⁴	BPN ⁵
	Produtividade	absorvido					
Experimentokg ha ⁻¹kg kg ⁻¹				
2010							
0	8476 d	132 b	-	-	-	-	-
30 DN	9798 c	175ab	44,1a	326,6 a	30,4bc	1,28a	4,25 a
60 DN	10001 bc	177ab	30,3ab	166,7 b	23,1c	0,75a	2,17 b
90 DN	10846 bc	203ab	26,3 b	120,5 c	34,7ab	0,79a	1,57 c
120 DN	11023 b	191ab	24,0 b	91,9 d	31,1abc	0,50a	1,19 d
180 DN	13157 a	228a	26,0 b	73,1 e	41,9 a	0,53a	0,95 e
CV (%)	3,6	15,4	20,6	2,1	12,3	38,7	2,1
2011							
0 DN	3179 c	72 b	-	-	-	-	-
30 DN	3927 b	69 b	24,9 ab	130,9 a	42,5 a	0,63 a	1,70 a
60 DN	4875 a	80 b	29,6 a	81,2 b	51,1 a	0,66 a	1,05 b
90 DN	4853 a	108 a	18,6 bc	53,9 c	33,4 a	0,64 a	0,70 c
120 DN	4984 a	109 a	15,0 cd	41,5 d	31,4 a	0,49 a	0,54 d
180 DN	4994 a	108 a	10,1 d	27,7 e	32,5 a	0,32 a	0,36 e
CV (%)	5,1	9,7	11,5	6,1	32,1	29,1	6,2

DN= Dose de Nitrogênio.

EAN¹= Eficiência Agronômica do Uso do N; EAN; PPF²= Produtividade Parcial do Fator; EFN³= Eficiência fisiológica do N; ERN⁴= Eficiência Aparente de Recuperação do N; BPN⁵ = Balanço Parcial do N. Médias com letras iguais, minúsculas, não diferem entre si pelo Tukey a 5% de significância.

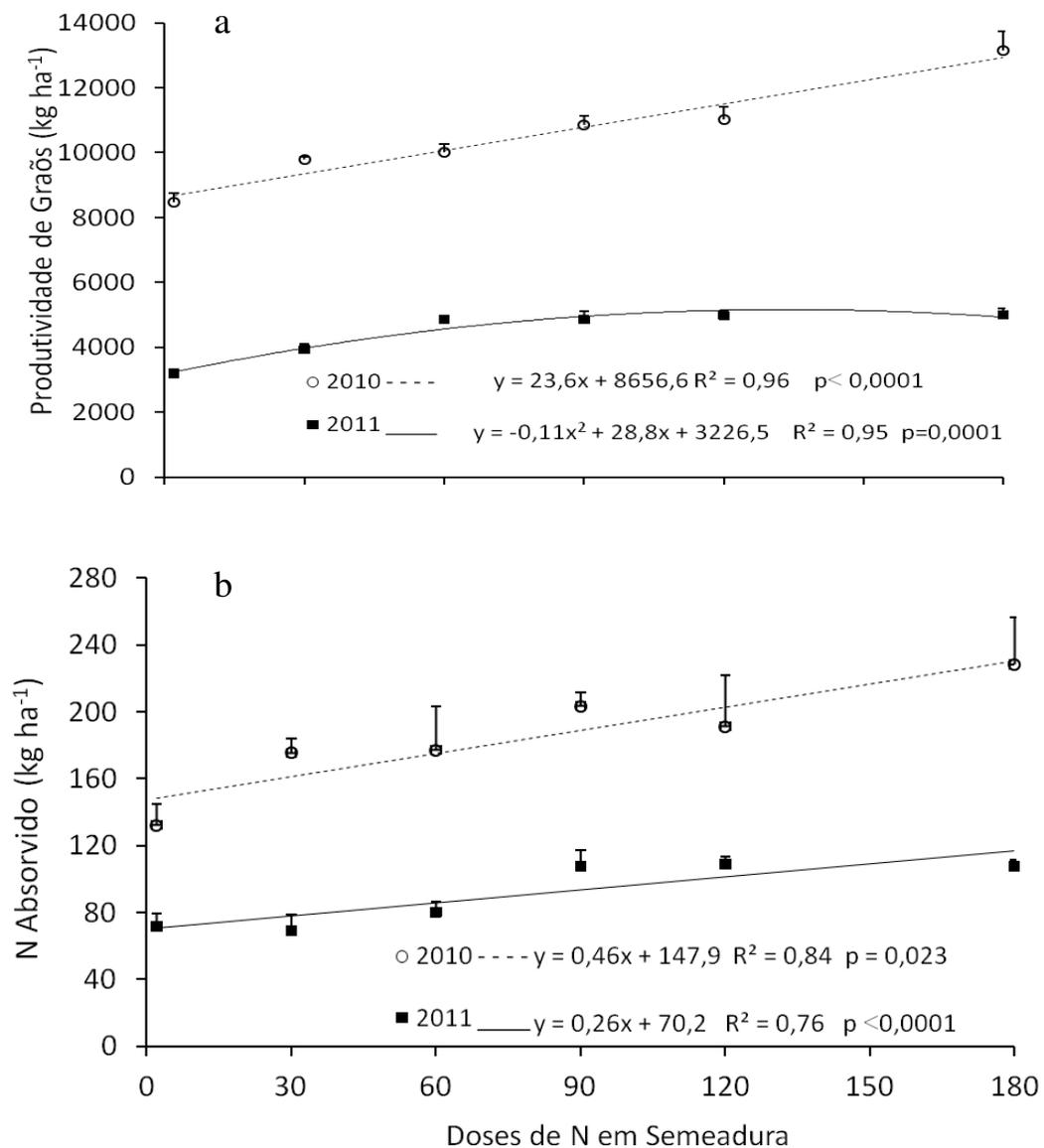


Figura 2 - Rendimento de grãos em kg ha⁻¹ (a) e produtividade parcial do fator (PPF) em kg kg⁻¹ (b) em função das doses de Nitrogênio. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.

Na Figura 2a verificam-se resposta nos rendimentos de grãos de milho em função das doses de N aplicadas nos dois anos. No experimento 2010 foi de forma linear ($R^2 = 0,96$) para todos os tratamentos, com um aumento porcentual da produtividade de até 55% em comparação com a testemunha 8.476 kg ha⁻¹. Porém, no experimento 2011, houve resposta significativas somente nas doses 30 e 60 kg ha⁻¹ de N com produtividades de 3.927 e 4.875 kg ha⁻¹ de grãos, obtendo um

aumento de até 53% em comparação com a testemunha, sendo ajustada uma relação exponencial ($R^2=0,94$), entre os tratamentos.

Para os valores de N absorvido (Figura 2b) ajustaram-se regressões lineares em função das doses de N aplicadas $R^2= 0,84$ para o experimento 2010 e $R^2= 0,75$ para o experimento 2011, demonstrando relação direta do N absorvido com as doses crescentes de N e a produtividade de grãos.

5.5.2. Produtividade parcial do fator (PPF) e a eficiência agrônômica do uso de N (EAN) em função da fertilização nitrogenada.

Os valores do índice PPF são originados de um cálculo direto que integra as unidades de produção do milho pela unidade de N aplicado. No experimento 2010 as doses 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N originaram valores altos de PPF de 326, 166, 120, 91 e 73 kg kg⁻¹ de grãos por N aplicado respectivamente. Comparando com o experimento 2011 com as doses crescentes de N foi observado valores menores de PPF 131, 81, 54, 41, 28 kg kg⁻¹. Relações lineares decrescentes foram encontradas nos experimentos com $R^2=0,72$ e $R^2=0,83$ respectivamente (Figura 3a).

Segundo Dobermann (2007) as condições ideais de produção com máxima EAN posicionam-se nos valores entre 40 e 80 kg kg⁻¹ de PPF. Nesta situação verificou se no experimento 2010 nas doses 120 e 180 kg ha⁻¹ de N e no experimento 2011 nas doses de 60 e 90 kg ha⁻¹ de N valores PPF próximos aos valores ideais propostos por Dobermann (2007) e Garcia (2009). Rillo e Richmond (2006) na Argentina encontraram resultados semelhantes com doses de aplicação entre 50 e 220 kg de N na semeadura, onde observaram valores de PPF de 360 e 55 kg kg⁻¹.

A EAN integra o aumento das unidades de produção do milho pela unidade de N aplicado. Snyder e Bruulsema (2007) consideram EAN como o índice que melhor reflete o impacto do fertilizante aplicado. Na Figura 3b, podem-se observar os resultados obtidos de EAN sendo um ajuste da equação linear ($R^2= 0,96$) e uma equação exponencial ($R^2= 0,94$), onde as doses 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N originaram valores EAN de 44, 30, 26, 24 e 26 kg kg⁻¹ de grãos por N aplicado para

o experimento 2010 e valores EAN de 25, 30, 19, 15, 10 kg kg⁻¹ de grãos por N aplicado no experimento 2011.

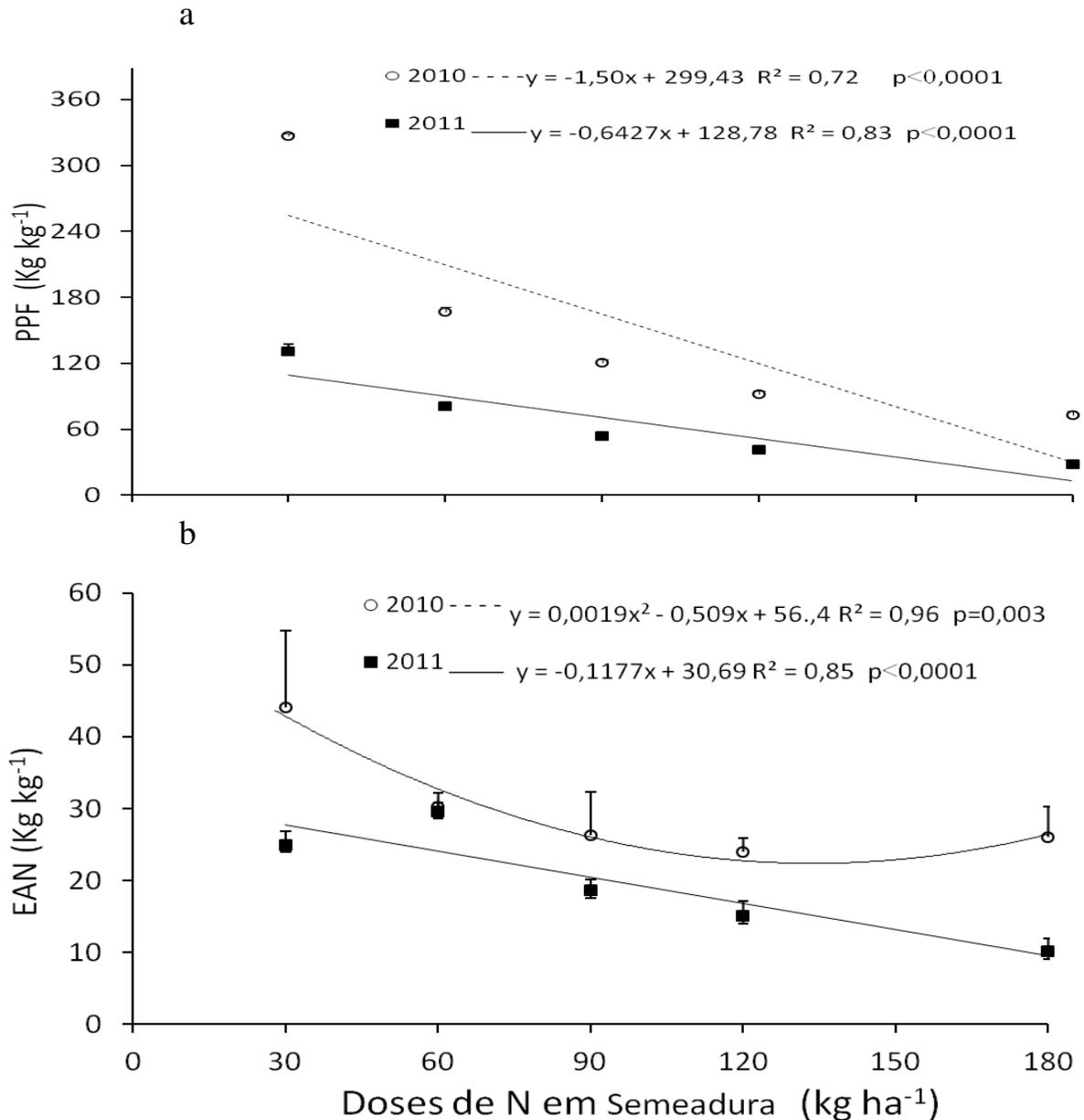


Figura 3 - Produtividade parcial do fator (PPF) em kg kg⁻¹ (a) e a eficiência agrônoma do uso de nitrogênio (EAN) em kg kg⁻¹ (b) em função das doses de N. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.

Segundo Dobermann (2007) e Snyder e Bruulsema (2007) a faixa encontrada de EAN está entre 10 e 30 kg kg⁻¹. Também relataram que as condições ideais de

manejo e produção de milho estão acima de 25 kg kg^{-1} de EAN. Em 2010, a maioria das doses de N aplicadas ficaram dentro da faixa ótima proposta pelos pesquisadores. Porém, em 2011 somente as doses 30 e 60 kg ha^{-1} de N aplicado. Na dose 30 kg ha^{-1} de N se obtiveram o maior EAN (44 kg kg^{-1}) e também o menor rendimento de grãos de 9.798 kg ha^{-1} com as doses de N aplicadas. Entretanto, em 2011 a maior EAN (30 kg kg^{-1}), foi encontrada na dose 60 kg ha^{-1} de N com o rendimento de 4.875 kg ha^{-1} .

Boaretto et al. (2007) explicam que o uso eficiente de N pode variar de acordo com a expectativa de produção, porém, não se deve priorizar alta eficiência em detrimento da produtividade. A lei dos rendimentos decrescentes indica que com o aumento da dose de N os aumentos na produtividade são menores, e, portanto, menores as eficiências obtidas. No Brasil, Fernandes et al. (2005) e Farinelli e Borges (2010) encontraram resultados onde também a EAN reduzia de 80 até 20 kg kg^{-1} com o aumento das doses de 40 até 180 kg ha^{-1} de N aplicado. Também experimentos na Argentina demonstraram que com doses de N em semeadura de 46 , 150 e 220 kg ha^{-1} de N verificou-se a também que a EAN reduzia em torno de 50 , 30 e 20 kg kg^{-1} respectivamente (RILLO; RICHMOND, 2006).

5.5.3 Eficiência aparente da recuperação de N (ERN), balanço parcial do nutriente (BPN), e eficiência fisiológica do N (EFN) em função das doses de N.

Outro índice agrônomo calculado no trabalho e visando explicar a EUN de N no milho foi à ERN onde se determina as unidades de nutriente absorvido pela unidade do nutriente aplicado. Dobermann (2005) explicou que a ERN depende da relação entre a exigência de absorção da planta, com a disponibilidade e liberação do nutriente aplicado. Isto é afetado por vários fatores que são o método de aplicação de N, local, momento, dose e a fonte do fertilizante. Esse mesmo autor demonstrou fazendo um resumo dos dados de mais de 850 experimentos, que na adubação a ERN para os cereais situa-se na maioria das vezes entre 50% e 55% do fertilizante aplicado.

Na Figura 4a, verificam-se valores para o ERN calculada para os experimentos. Os resultados obtidos ajustaram se em equações lineares

decrecentes ($R^2=0,68$ e $R^2=0,84$), onde no experimento 2010 as doses 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N originaram valores ERN de 1,28; 0,75; 0,79; 0,50 e 0,53 kg kg⁻¹ e para o experimento 2011 valores ERN de 0,46; 0,46; 0,64; 0,49; 0,32 de N absorvido por N aplicado. Dobermann (2007) e Snyder e Bruulsema (2007) obtiveram valores semelhantes de ERN para cereais, em torno de 0,30 e 0,50 e tais autores, consideram um sistema de manejo eficiente quando são encontrados valores ERN entre 0,50 e 0,80 kg kg⁻¹.

Nos experimentos, a ERN demonstra que houve uma eficiente absorção pelo milho nas doses maiores de 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N aplicado, resultando em uma alta recuperação do N no sistema. Já para a dose de 30 kg ha⁻¹, o milho exportou em torno de 30% mais do sistema, comparada a quantidade de fertilizante suprido. Porém, no segundo ano, somente até a dose 90 kg ha⁻¹ de N aplicado foram verificados valores de alta eficiência de recuperação de N no sistema.

Houve queda de ERN nas doses maiores de N aplicado tais como 120 e 180 kg ha⁻¹. Resultados semelhantes foram encontrados anteriormente na Argentina, onde para uma dose baixa de N (46 kg ha⁻¹) encontrou-se ERN em torno de 1,3 kg kg⁻¹ e para doses altas de 150 e 220 kg ha⁻¹ de N na semeadura, foram verificados valores próximos de 0,7 kg kg⁻¹ (RILLO; RICHMOND, 2006).

Cassman et al. (2002) encontrou valores mais baixos, revisando informações de 55 experimentos no milho em EUA, onde a dose média 103 kg ha⁻¹ de N, os valores de ERN estavam em torno de 0,37 kg kg⁻¹. Ladha et al. (2005) em 36 observações em milho na Europa, encontrou para uma dose média de 100 kg ha⁻¹ de N, valores de ERN média de 0,63 kg kg⁻¹ com semelhanças aos encontrados neste trabalho com as doses 60 e 90 kg ha⁻¹.

Na Figura 4b, verifica-se o comportamento do índice agrônomo denominado BPN que integra a quantidade removida pela colheita de grãos do milho pela unidade de nitrogênio aplicado. Os resultados obtidos de BPN ajustaram se nas relações lineares decrescentes ($R^2= 0,72$ e $R^2= 0,82$).

Segundo Snyder e Bruulsema (2007), os valores de BPN em torno de 0,7 e 1,3 kg kg⁻¹ indicam a sustentabilidade do sistema de produção, e valores acima são considerados altos, indicando que as plantas utilizam N das reservas do solo e valores abaixo são considerados deficientes, que precisam uma adição ao sistema.

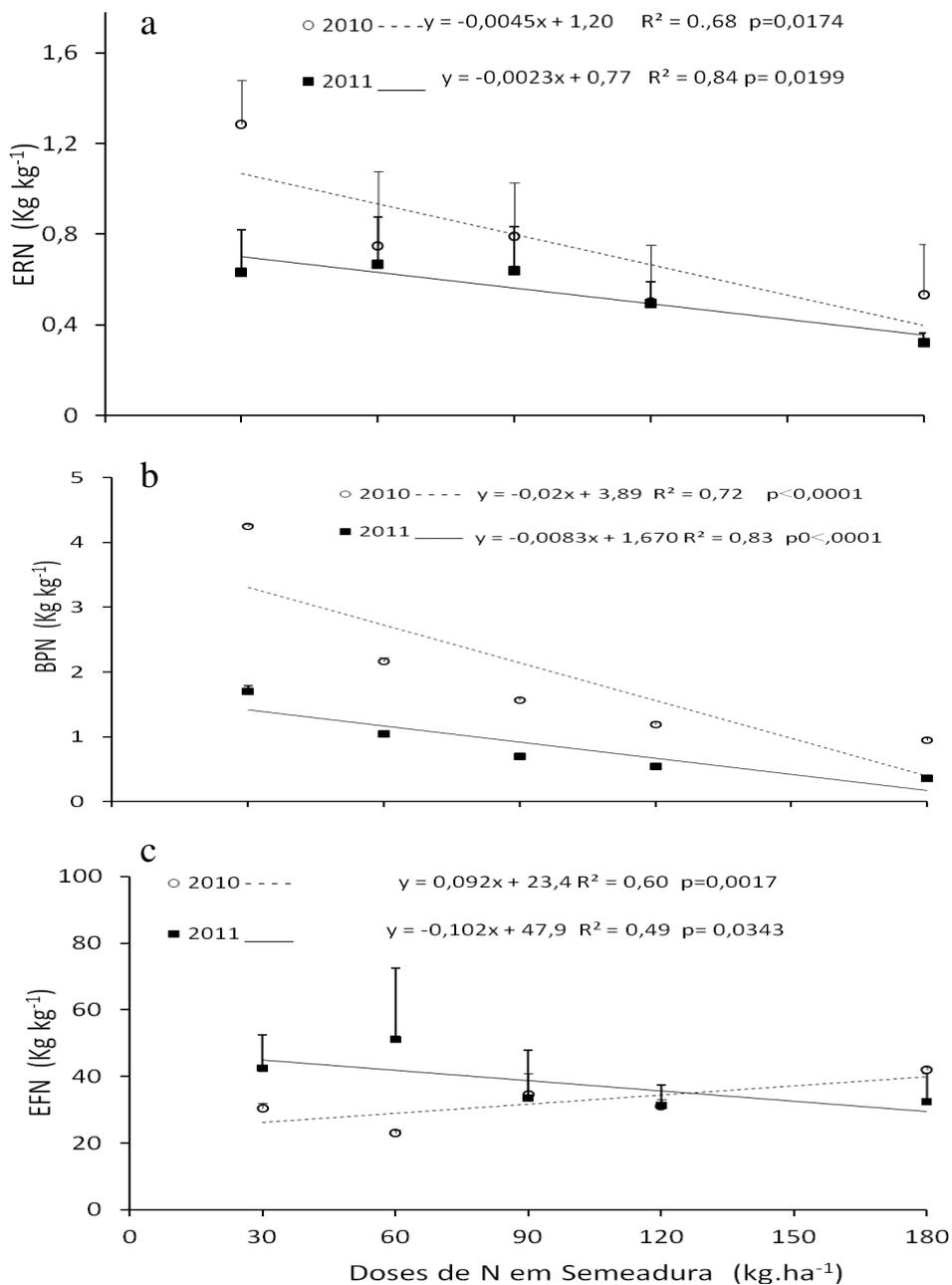


Figura 4 - Eficiência aparente de recuperação de N (ERN) em kg kg⁻¹ (a) , balanço parcial de N (BPN) em kg kg⁻¹ (b) e eficiência fisiológica de N (EFN) em kg kg⁻¹ (c) em função das doses de N. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.

No experimento 2010 as doses mais baixas de 30 e 60 kg ha⁻¹ ocasionaram perdas e desequilíbrio no sistema já que foram removidos duas vezes mais de N pelos grãos do N total ingressado no sistema pelo adubação. Já nas doses 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, as remoções e as entradas foram equilibradas com a relação entrada/saída de N próximos ao valor 1 kg kg⁻¹. Rillo e Richmond (2006) obtiveram

anteriormente dados com a mesma tendência. A dose baixa de N em semeadura de 46 kg ha⁻¹ de N ocasionou um BPN alto de 3 kg kg⁻¹ indicando maior saída que entrada do nutriente. Doses maiores de 150 e 220 kg ha⁻¹ foram melhorando o BPN ficando perto de 1 kg kg⁻¹. Já para o experimento 2011 a dose 60 kg ha⁻¹ de N verificou se um valor muito próximo ao equilíbrio na relação adição e exportação de N no sistema e as doses maiores, apresentando valores baixos de BPN que indicam baixa exportação de N pelos grãos. García (2009) estimou o BPN na Argentina na safra 2007/2008, em média de 1,14 kg kg⁻¹ indicando valores semelhantes aos encontrados neste trabalho.

Na comparação com os outros índices em estudos, a EFN foi a que apresentou as menores relações com o N aplicado. Para o experimento 2010 ajustou-se uma equação linear crescente ($R^2=0,60$) e para o experimento 2011 uma relação quadrática ($R^2=0,60$) (Figura 4c).

Os níveis de referencia de EFN para cereais estão entre 40 e 80 kg kg⁻¹ para uma nutrição equilibrada de N. Valores baixos de EFN indicam limitações na produtividade relacionados com a deficiência do nutriente, estresse hídrico ou de temperatura, toxicidade mineral, entre outros fatores (DOBERMANN, 2007).

Analizando a Tabela 4 podemos resumir segundo os valores dos índices agrônômicos avaliados e com os valores de referência adotados (DOBERMANN, 2007; SNYDER; BRUSELMA; 2007) que com a dose máxima de 180 kg ha⁻¹ no primeiro ano, existiu maior disponibilidade de N que resultou em maior rendimento de grãos, maior BPN, EFN e ERN e uma EAN e PPF que indicam boa eficiência de uso de N no sistema. Entretanto para 2011, as melhores condições foram com a dose 60 kg ha⁻¹ sendo nesta o valor mais alto de EFN e de EAN, além de um BPN equilibrado na relação adição e exportação do nutriente no sistema.

Tabela 4 – Tratamentos com valores na faixa ótima proposta de eficiência de uso de nitrogênio. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.

*Faixa ótima EUN	Tratamentos com EUN ótima	
	Experimento 2010 ----- Doses de N aplicado em kg ha ⁻¹ -----	Experimento 2011
PPF ¹ > 60 kg kg ⁻¹	30, 60, 90,120,180	30, 60
EAN ² >25 kg kg ⁻¹	30, 60, 90, 180	30, 60
BPN ³ 0,7 - 1,3 kg kg ⁻¹	120, 180	60, 90
ERN ⁴ 0,5 - 0,8 kg kg ⁻¹	60, 90, 120, 180	30, 60, 90
EFN ⁵ 40 - 80 kg kg ⁻¹	180	30, 60, 180

* Valores de referência adotados (DOBERMANN, 2007; SNYDER; BRUSELMA; 2007). PPF¹= Produtividade Parcial do Fator; EAN²= Eficiência Agronômica do Uso do N; BPN³ = Balanço Parcial do N; ERN⁴= Eficiência Aparente de Recuperação do N; EFN⁵= eficiência fisiológica de N (EFN).

5.5.4 Benefício econômico (BEN) em função das doses de N.

O cálculo do benefício econômico da adubação de N (BEN) nos anos de 2010 e 2011, foram calculados baseados na diferença obtida nos tratamentos com adubação e a testemunha, sem N. Determinou-se o BEN com preços de U\$ 0,18 pelo kg de milho e o valor de N baseado no preço da Ureia foram de U\$ 1,77 pelo kg do N, valores praticados do departamento comercial da Cooperativa Colônias Unidas, Paraguai (data: 20-07-2012).

Em 2010 o maior BEN foi de U\$ 524 ha⁻¹ encontrada com a maior dose de 180 kg ha⁻¹ e nessa dose duplicou-se o benefício econômico da adubação de N em relação aos demais tratamentos. Já no Experimento 2011 com a mesma dose 180 kg ha⁻¹ foi obtido o mais baixo BEN de U\$ 8 ha⁻¹. Assim, na dose 60 kg ha⁻¹ foi encontrado maior benefício com U\$ 199 ha⁻¹, com BEN maior que 2010 com diferença de U\$ 31 ha⁻¹ (Figura 5).

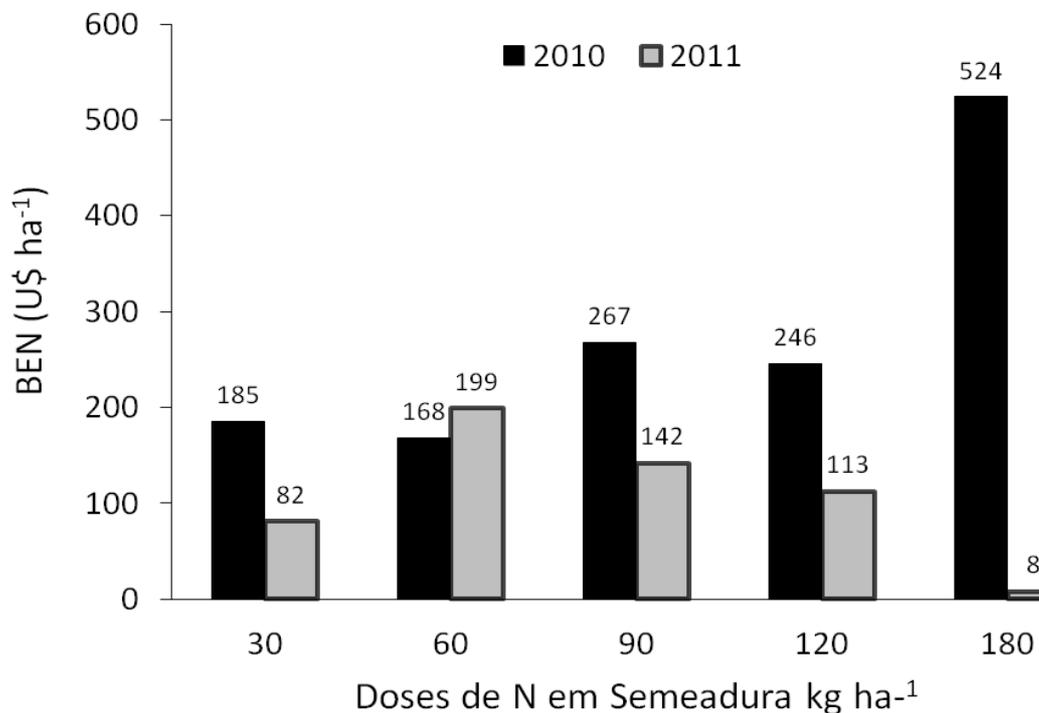


Figura 5 – Benefício econômico da adubação de N (BEN) em US\$ ha⁻¹ em função das doses de Nitrogênio. Paraguai, Experimentos 2010 e 2011.

As estatísticas de produção revelam que nos anos em que ocorrem períodos secos, durante os meses de verão, a produtividade das culturas de verão é reduzida, causando prejuízos às cadeias produtivas (MATZENAUER et al., 2002). Por este motivo, é importante compreender e quantificar os processos que envolvem relações clima-planta, em particular as relações hídricas e nutricionais. No primeiro ano houve resposta até a dose máxima em função do clima favorável, no segundo ano somente até a dose 60 kg ha⁻¹. Portanto, existiu uma forte interação com o clima. Este fato justifica que ajustes devem ser feitos durante o desenvolvimento do milho tendo em

conta previsões climáticas próximas e existe maiores riscos com antecipação total de N na semeadura. Recomenda-se estudar a combinação da adubação de N em semeadura complementando com N em cobertura, visando encontrar a dose eficiente e o momento certo de adubar para cada condição de clima e região. O uso da adubação de cobertura de N é respaldado pelo maior aproveitamento do N, resultante da sincronização entre as aplicações com o período de alta demanda do nutriente do milho e a possibilidade de mudar a dose de N em cobertura e estimar produtividade de acordo com a previsão ambiental para cada safra, desta forma, se conseguiria mitigar perdas ambientais e econômicas na adubação de N no milho (AMADO et al., 2002; SILVA et al., 2005, MELCHIORI, 2010).

5.6 Conclusões

Nos experimentos houve resposta à fertilização nitrogenada, refletindo em altas produtividades no experimento 2010 pela frequência estável de precipitação no desenvolvimento do milho e no experimento 2011 a resposta foi inferior devido à restrição hídrica.

A EUN baseada na produtividade de grãos demonstraram valores decrescentes de PPF e de EAN em função do aumento de N aplicado.

Os índices BPN, ERN e EFN demonstraram na dose 180 kg ha⁻¹ de N para o experimento 2010 e na dose 60 kg ha⁻¹ de N para o experimento 2011 uma melhoria na EUN, com um balanço equilibrado e alta recuperação do N nos ambientes de produção estudados. Assim também nestas mesmas doses existiram os maiores retornos econômicos com a adubação de N nos experimentos.

5.7 Referências bibliográficas

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.241-248, 2002.

AMARAL FILHO, J. P. R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J. C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 467-473, 2005.

BOARETTO A.; MURAOKA T.; TRIVELIN P.; Uso eficiente de nitrogênio nos fertilizantes convencionais. INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – BRASIL. **INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS Nº 120** – DEZEMBRO/2007

CAPECO – **Cámara Paraguaya de Exportadores de Cereales y Oleaginosas**. 2011. Disponível em: <www.capeco.org.py>. Acesso em: 3 nov. 2011.

CANTARELLA H.; MONTEZANO. F.Z. **Nitrogênio e Enxofre**. In: PROCHNOW, L.I; CASARIN, V.;STRIPP, S.R Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes Piracicaba, SP: IPNI-Brasil, v.2. p1-46. 2010.

CASSMAN, K.G., A. DOBERMANN, AND D.T. WALTERS.. **Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management**. *Ambio* 31:132-140. 2002

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio (15N) em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v. 15, n. 2, p.187-193, 1991.

COOKE, G.W. Maximizing fertilizer efficiency by overcoming constraints to crop growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.10, p.1357-1369, 1987.

DOBERMANN, A. **Nitrogen use efficiency: state of te art**. Proc. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertiliser. Frankfurt, Germany. p. 1-16. 2005.

DOBERMANN A. **Nutrient Use Efficiency – Measurement and management**. IFA Internacional Workshop on fertilizar best management practices. 7-9 Marzo, Bruselas,Bélgica. 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; RIZZARDI, M.A.; ARGENTA, G. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.71-77, 1997.

FARINELLI R.; BORGES L. Produtividade e eficiência agrônômica do milho em função da adubação nitrogenada e manejos do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.9, n.2, p.135-146, 2010

FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 4, n. 2, p. 195-204, 2005.

FERREIRA, D. F. **Programa Sisvar.exe**: sistema de análise de variância. Lavras: UFLA, 2010.

GARCÍA F. **Eficiencia de uso de nutrientes y mejores prácticas de manejo para la nutrición de cultivos**. p. 9-19. In: Simposio Fertilidad 2009. Acasuso. International Plant Nutrition Institute. p.250. 2009

GAVA, G.J.C. **Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho**. 2002. 125f. (Tese de Doutorado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GROSS, M. R.; VON PINHO, R. G.; BRITO, A. H. Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamento entre fileiras na cultura do milho em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 3, p. 387-393, 2006.

KÖPPEN, W. 1931. **Climatologia**. Buenos Aires, Fondo de Cultura Económica.

LADHA, J.K., H. PATHAK, T.J. KRUPNIK, J. SIX, AND C. VAN KESSEL.. **Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production**: retrospects and prospects. Adv. Agronomy. 2005

LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.215- 226, 2005.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631p.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MALUF, J.R.T.; BARNI, N.A.; BUENO, A.C.; DIDONE, I.A.; ANJOS, C.S.; MACHADO, F.A.; SAMPAIO, M.R. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja**, no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105p. (BOLETIM Fepagro,10).

MELCHIORI, R.J.M. Sensores remotos para el manejo del nitrógeno. In: **Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas**, 9., 2010, Manfredi. Anais Córdoba: INTA, 2010. p 215-220.

MELGAR, R. **Fertilización en el Corn Belt**. Es tan diferente de lo que hacemos aquí? Fertilizar No 5, p 21-31, Octubre 2006, Buenos Aires, Argentina. 2006.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTI, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 36, 2759-2781. 2005.

RAUN, W. R., and G. V. JOHNSON. 1999. Improving N use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal** 91: 357–363.

RILLO S. y RICHMOND P. **Evaluación de tres criterios de fertilización nitrogenada en el cultivo de maiz en siembra directa en un suelo hapludol**. Maíz en Siembra directa. 78/74. AAPRESID. Rosario, Argentina. 2006

SALL, J.; CREIGHTON, L.; LEHMAN, A. **JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software**. 3rd ed. Cary: Duxbury Press, 2005. 580p.

SILVA, E.C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; LAZARINI, E.; SÁ M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.353-362, 2005a.

SCHMIDT, G. Volumen 7 – **Cuenca del Arroyo Capiibary**, simulación del flujo subterráneo. - Informe no publicado (Proyecto SAG-PY: Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay SEAM/BGR), No. de archivo BGR 0127039, Asunción, Hannover. 2009. (PDF, 5 MB)

SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; ALVES SOBRINHO, T.; FEDATTO, E.; ZANON, G. D.; HASEGAWA, E. K. B. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade de milho em plantio direto irrigado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 3, p. 55-62, 2003.

SNYDER C.S. Y T.W. BRUULSEMA. 2007. **Nutrient use efficiency and effectiveness in North America**: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. IPNI. Junio 2007.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen deficiency in maize.I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. **Crop Science**, v.35, p.1376-1383, 1995.

6 ARTIGO 2: ESTADO NUTRICIONAL E RENDIMENTO DO MILHO AVALIADO PELO NDVI OBTIDO COM ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

6.1 Resumo

A eficiência do uso de nitrogênio (EUN) diminuiu em relação ao aumento de doses aplicadas, em vista de o suprimento de N exceder as necessidades da cultura, e as doses superiores podem gerar perdas econômicas e risco de poluição ambiental. O índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) obtido com espectroscopia óptica apresenta-se como uma ferramenta para a gestão eficiente da adubação nitrogenada no milho pela capacidade de estimar sua deficiência em plantas de forma rápida e não destrutiva. Existe a necessidade de gerar dados regionais para determinar recomendações de uso do sensor com a capacidade de estimar com valores NDVI o *status* de N em planta e seu potencial produtivo para cada situação de solo e clima visando melhores práticas para aumentar a EUN. Este trabalho tem como objetivo avaliar no Paraguai a relação dos valores NDVI determinado pelo Sensor Óptico Greenseeker (NTech Industries, 2005) com a biomassa acumulada na parte aérea, o nitrogênio absorvido e a produtividade do milho em função do nitrogênio aplicado. O sensor gera valores de NDVI e utiliza relação entre os comprimentos de ondas no espectro do vermelho visível (660nm) e infravermelho próximo (770nm). Para avaliar relações, determinou-se os valores NDVI no desenvolvimento do milho em V6, V8, V10, V12 e V14 e também avaliou-se a quantidade absorvida de N, a biomassa acumulada na parte aérea e o rendimento de grãos em função de doses 0, 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N aplicado na semeadura em dois anos consecutivos (2010 e 2011). O NDVI apresentou relações significativas com a biomassa acumulada na parte aérea e o nitrogênio absorvido em função do nitrogênio aplicado e mostrou-se como ferramenta potencial para a detecção da deficiência de nitrogênio nas condições climáticas apresentadas, sendo verificada nos estádios V8 e V10 uma maior amplitude do NDVI em função à deficiência e ao N aplicado em semeadura, indicando-se pesquisas sobre eficiência da adubação de cobertura tardia de N para a geração de recomendação de adubação de N em cobertura no milho baseado em leituras NDVI.

Palavras-chave: agricultura de precisão, sensor óptico, nitrogênio.

NUTRITIONAL STATUS AND YIELD OF THE CORN EVALUATED BY NDVI OBTAINED WITH OPTICAL SPECTROSCOPY

6.2 Abstract

The nitrogen use efficiency decreased in relation to increasing doses, in view of the supply of N exceeds the needs of culture, and higher doses can cause economic losses and environmental pollution risk. The normalized difference vegetation index (NDVI) obtained with optical spectroscopy is presented as a tool for promissory efficient management of nitrogen fertilization in maize by the ability to estimate its deficiency in plants quickly and non-destructively. There is a need to generate regional data to determine recommendations for use of the sensor with the ability to estimate NDVI values of N status in plant and its production potential for each situation of soil and climate in order to best practices to increase the efficiency of nitrogen use. This study aims to evaluate in Paraguay the relationship of NDVI values determined by Optical Sensor Greenseeker (NTech Industries, 2005) with the biomass accumulated in the shoot, the nitrogen absorbed and corn yield as a function of applied nitrogen. The sensor generates NDVI values and uses the relationship between wavelengths in the spectrum of visible red (660nm) and near infrared (770nm). To study relationships, it was determined NDVI values in the development of maize in V6, V8, V10, V12 and V14, and also evaluated the amount of absorbed N, biomass accumulated in shoots and grain yield as a function of doses 0 , 30, 60, 90, 120 and 180 kg ha⁻¹ of N applied at sowing in two consecutive years (2010 and 2011). The NDVI showed significant relationships with biomass accumulated in shoots and nitrogen absorbed as a function of applied nitrogen and showed up as a potential tool for the detection of nitrogen deficiency in climatic conditions presented, being verified in stages V8 and V10 greater amplitude of NDVI due to disability and to N applied at sowing, indicating up research on the effectiveness of late topdressing of N with optical spectroscopy to the generation of N fertilizer recommendation in the soil based on NDVI readings.

Keywords: precision agriculture, optical sensor, nitrogen.

6.3 Introdução

Na área de agricultura de precisão a espectroscopia óptica terrestre tem se mostrado uma ferramenta valiosa no monitoramento de culturas agrícolas, devido principalmente à sua capacidade de identificar diferenças nas condições vegetativas através de valores de reflectância espectral. Tumbo et al., (2002) afirmou que a mensuração da reflectância espectral demonstra capacidade de diagnosticar deficiência de nitrogênio (N) nas culturas sem entrar em contato físico e sem destruir a planta. O sensoriamento remoto é uma ferramenta acurada para o monitoramento das poáceas, pois torna possível observar a variabilidade espacial de toda a área (WRIGHT et al., 2004); outros métodos de determinação de teores de N, como medidores de clorofila e análise foliar, utilizam pequena quantidade de amostras da planta e leva maior tempo para determinação da condição nutricional da cultura na lavoura.

Alguns desses sensores são gerados com base em variáveis espectrais, como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O NDVI foi proposto por Rouse et al. (1973) para a quantificação do crescimento da vegetação e da biomassa acumulada e varia de -1 a +1. Liu (2007) reportou que os valores NDVI negativos indicam presença de solo sem cobertura vegetal e quando aumenta positivamente o valor NDVI, proporcionalmente aumenta o vigor da vegetação.

O sensor óptico terrestre “Greenseeker” (NTech Industries, 2005) é um dos equipamentos que gera valores de NDVI das culturas de forma não destrutiva e utiliza como princípio a relação entre os comprimentos de ondas no espectro do vermelho visível (660nm) e infravermelho próximo (770nm), sendo indicado para adequar adubações nitrogenadas em taxa variável e tempo real com a criação de algoritmos de respostas da adubação nitrogenada de cobertura em cada região (RAUN et al., 2005).

O uso do sensor óptico e sua relação com o desenvolvimento do milho vêm sendo avaliados em diferentes regiões do mundo e demonstram elevada relação entre a nutrição de N em diferentes estádios fenológicos e o NDVI obtido pelo sensor óptico (RAUN, 2005). Além disto, outros estudos tem reportado uma elevada relação entre o rendimento do milho e o NDVI (TEAL et al., 2006); também uma correlação alta com a biomassa acumulada e com o N absorvido em estádios superiores entre

V8 e V12 (MARTIN et al., 2007; FREEMAN et al., 2007; SOLARI et al., 2008). Assim, também há uma integração entre NDVI com a altura, distanciamento e variabilidade entre plantas de milho (MARTIN et al., 2012).

Em países sul-americanos, os estudos com espectrometria óptica são recentes, no Brasil, o NDVI determinado pelo “Greenseeker” foi indicado como ferramenta de utilidade promissória para melhorar a eficiência de uso do N em cereais de estação fria (BREDEMEIER, 2009). Demonstrou potencial para manejo da adubação de N e para diagnosticar sua deficiência em trigo (POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009), triticale (POVH et al., 2008), algodão (MOTOMIYA et al., 2009), cevada (POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009) e cana-de-açúcar (PORTZ et al., 2012). Deste modo, um trabalho com milho verificou baixa relações NDVI com doses crescentes de N aplicado (POVH et al., 2008).

Na Argentina existem avanços em milho e trigo, dados de Melchiori (2010) com pesquisas de longa duração vêm demonstrando uma grande resposta da adubação de N com diagnóstico NDVI, principalmente aumento na eficiência no uso do N no atraso da adubação em estádios mais avançados (V8 até V14) baseado na metodologia propostas por Raun et al. (2005) que leva em consideração a variabilidade de índices de resposta do potencial produtivo e da refletância NDVI do cultivo comparados com uma faixa de dose alta de N não limitante da produtividade.

Desta forma, existe necessidade de ampliar os trabalhos de pesquisas, visando utilizar a espectroscopia óptica como ferramenta na adubação de N e conhecer as respostas para cada condição edafoclimática e cultivo. O presente trabalho tem como objetivo avaliar no Paraguai a relação dos valores NDVI determinado pelo sensor óptico “Greenseeker” com a biomassa acumulada na parte aérea, o N absorvido e a produtividade do milho em função do N Aplicado.

6.4 Materiais e Métodos

6.4.1 Localização e caracterização edafoclimática da região de estudo

Este estudo foi realizado na Região Oriental, ao sul de Paraguai. Possui um clima classificado segundo Köppen (1931) de Cfa, subtropical úmido, mesotérmico,

com verões quentes e invernos com geadas ocasionais. A precipitação média anual varia entre 1.300 a 1.900 mm, com chuvas distribuídas durante o ano e ocorrência de períodos de estiagem nos meses de julho e agosto, com temperatura média mensal de 17 a 27 °C. Os experimentos foram compostos por doses variáveis de N aplicados na semeadura do milho, montados no mesmo local por dois anos agrícolas: Experimento (2010) e Experimento (2011).

Os trabalhos a campo foram conduzidos no município de Alto Verá, Departamento de Itapúa, em área de um produtor da cooperativa Colônias Unidas. O solo dos experimentos classificados segundo o sistema brasileiro de classificação de solos como sendo Latossolos Vermelhos, com textura franco argilosa (Embrapa, 2006). Na Tabela 1 são apresentadas as características granulométricas e químicas dos solos, determinadas na implantação dos experimentos conforme procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995).

Tabela 1. Caracterização da fertilidade do solo antes da instalação do experimento, na camada 0-0,10 m de profundidade, Alto Verá, Itapúa, Paraguai.

Local	Argila ¹	MOS ²	pH água ³	P ⁴	K ⁴	Ca ⁵	Mg ⁵	Al ⁵	CTC
	-----g kg ⁻¹ -----			mg dm ⁻³		-----cmol _c L ⁻¹ -----			
Itapúa	441	33	5,7	6,09	0,12	4,54	1,32	0	9,9

¹Determinada por densimetria;; ²determinado pelo método Walkley-Black; ³determinado por potenciometria, ⁴determinado pela solução Mehlich⁻¹; ⁵ por extração com KCl (1 mol L⁻¹).

Os experimentos não foram irrigados e registraram, durante o ciclo da cultura do milho no Experimento 2010, elevada frequência de precipitações com 358,5 mm desde os 55 dias após semeadura (DAS) até a maturação fisiológica e no Experimento 2011 foi verificado déficit hídrico no final dos estádios vegetativos, desde os 55 DAS até a maturação fisiológica (141 mm), agravando-se com a baixa frequência de ocorrência de precipitação (Figura 1).

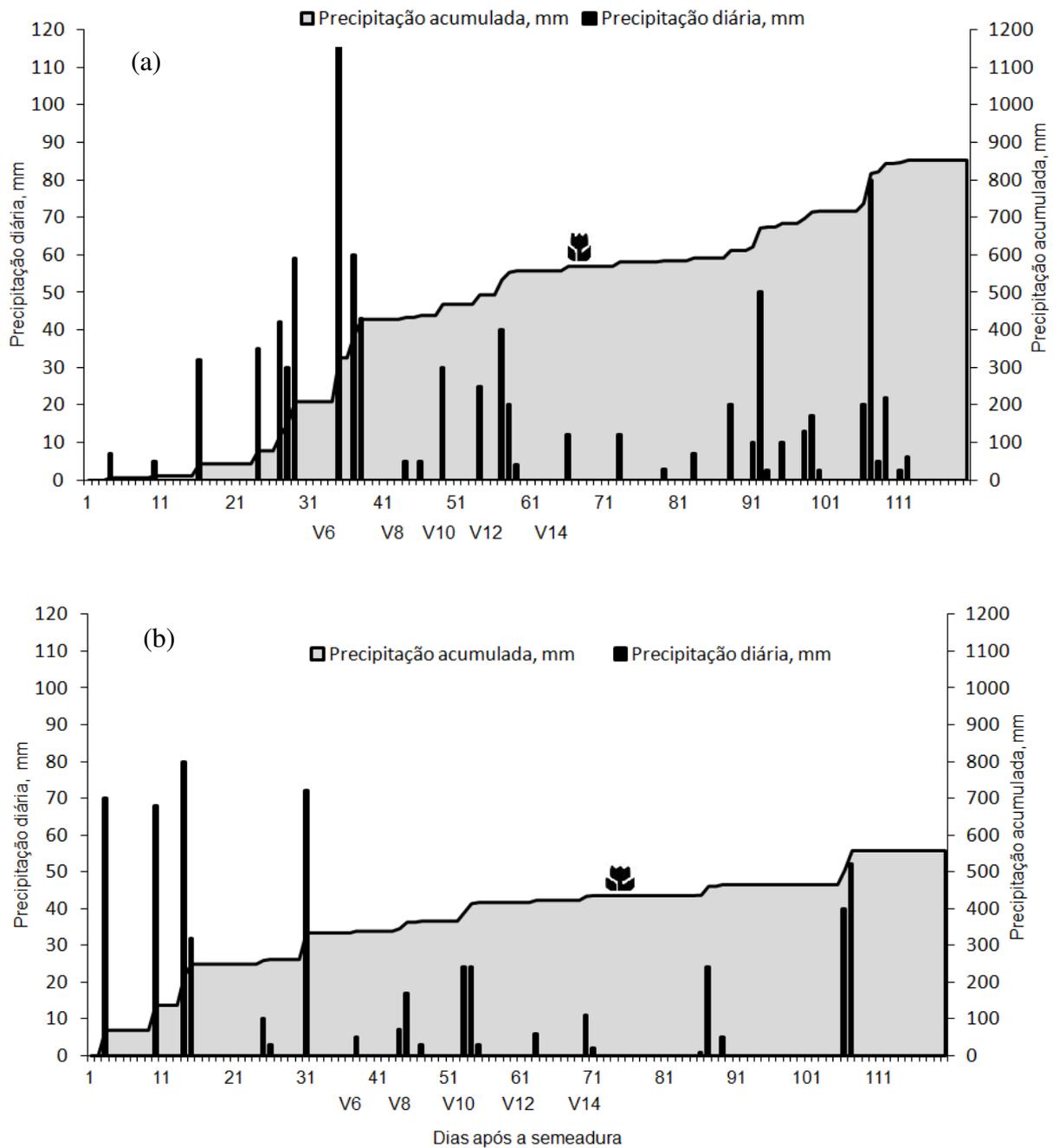


Figura 1 - Representação das precipitações diárias e acumuladas ocorridas nos experimentos durante o ciclo da cultura do milho na safra 2010 (a) e na safra 2011 (b) Alto Verá, Paraguai. V_{6,8,10,12,14} = estádios fonológicos do milho.

6.4.2 Características, condução e avaliações feitas nos experimentos

Na Tabela 2, apresentam-se as características gerais sobre os experimentos realizados.

Tabela 2 - Descrição das características dos Experimentos conduzidos em Alto Verá, Paraguai.

Características	Experimento 2010	Experimento 2011
Coordenadas	S 26°42'43.20"	S 26°42'43.20"
	W 55°44'45.6"	W 55°44'45.6"
Altitude (m)	310	310
Histórico <u>SPD</u> (anos)	12	13
Híbrido Semeado	DKB 390 <u>SSP</u>	DKB 390 <u>SSP</u>
Cultura Antecessora	Trigo	Trigo
Data de Semeadura	06/11/2010	29/09/2011
Leitura NDVI V6 (DAS)	34	36
Leitura NDVI V8 (DAS)	42	44
Leitura NDVI V10 (DAS)	48	51
Leitura NDVI V12 (DAS)	53	59
Leitura NDVI V14 (DAS)	62	68
Data de Colheita	29/03/2011	16/02/2012
Fertilização Fosfatada (kg ha ⁻¹)	90	90
Fertilização Potássica (kg ha ⁻¹)	60	60
Espaçamento (m)	0,70	0,70
População final (Plantas ha ⁻¹)	59000	55000

SPD: sistema plantio direto; SSP: simples semi-precoce; DAS: dias após semeadura. Leitura em estádios fonológicos da escala proposta por Ritchie et al.,(1993).

6.4.3 Delineamentos, unidades experimentais e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com três repetições. As dimensões das parcelas experimentais foram de 10m x 5m para todos

os tratamentos. Os tratamentos para o Experimento 2010 e 2011 foram de diferentes doses de N, aplicadas ao lanço na semeadura (0, 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), na forma de uréia.

Nos experimentos, as variáveis em estudo foram as doses N ao lanço, na linha foram adubações de K₂O e P₂O₅ constantes para os tratamentos (Tabela 2).

6.4.4 Uso do sensor óptico, determinação do nitrogênio absorvido e biomassa acumulada na parte aérea

As leituras NDVI nos experimentos foram feitas com sensor óptico ativo GreenSeeker (NTech Industries, 2005). É um sensor portátil, com dois tipos de LED (“light emitting diodes”), que emitem radiação em dois comprimentos de onda centralizados no vermelho (660nm) e no infravermelho próximo (770nm), com largura de banda de aproximadamente 25nm. Os dados de saída incluem cinco índices de vegetação, entretanto, para este trabalho, foram utilizados apenas os dados do NDVI representada pela equação proposta por Rouse et al. (1973):

$$(Eq.1) \quad NDVI = (\rho_{nir} - \rho_r) / (\rho_{nir} + \rho_r),$$

Onde: ρ_{nir} e ρ_r são as reflectâncias no infravermelho próximo e no visível, respectivamente para fins de quantificação do crescimento da vegetação e varia numericamente de -1 a +1.

Os dados foram coletados dinamicamente à distância de 0,60m entre o sensor e o alvo e o equipamento foi ajustado para uma leitura por segundo.



Figura 2 - Sensor GreenSeeker utilizado para leituras de NDVI no experimento. Paraguai, 2010/2011.

As diferentes doses de N foram aplicadas visando simular as mais variadas condições de desenvolvimento das plantas e assim obter diferentes leituras de NDVI, biomassa e produtividade de grãos. Foram feitas leituras com os aparelhos nos estádios fenológicos V6, V8, V10, V12 e V14 para geração de curvas de respostas e relacionar com a nutrição do milho. Com o sensor GreenSeeker foram realizados leituras NDVI em média de 40 pontos medidos em cada parcela experimental.

Após a medição da reflectância, foi realizada a coleta de plantas na mesma área avaliada pelo sensor. Amostras do tecido vegetais foram moídas e processadas no laboratório para determinar o N absorvido na biomassa acumulada na parte aérea. Nos estádios avaliados, coletaram-se, aleatoriamente, dentro de cada parcela, cinco plantas de milho para avaliação da massa da matéria seca, que foi determinada secando-se as plantas em estufa com circulação de ar forçada a 65 °C até peso constante. O teor de N no tecido da parte aérea do milho foi obtido digerindo-se 0,2g de matéria seca, com H_2SO_4 e mistura de digestão ($Na_2SO_4, CuSO_{4.5}H_2O$) seguida de destilação de arraste de vapor semimicro Kjeldahl, segundo metodologia proposta Tedesco et al. (1995).

A produtividade de grãos de milho foi avaliada colhendo-se manualmente as quatro linhas centrais de cada parcela, descartando-se 0,5m de cada extremidade, perfazendo uma colheita de área total de 4m², tendo-se corrigido o peso de grãos

para 14% de umidade. Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo programa SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2010) utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade e para análise de regressão foi utilizado o software JMP IN® Version 3.2.1 (SALL et al., 2005), utilizando o teste F a 5% de significância.

6.5 Resultados e Discussão

Para auxiliar as regressões realizadas e facilitar a descrição dos resultados obtidos, foi realizada análise de variância pelo teste de Tukey 5% da biomassa acumulada na parte aérea, N absorvido e NDVI em função das doses de N aplicadas nos Experimentos 2010 e 2011, que são apresentados na Tabela 1. Os atributos testados estatisticamente diferenciaram-se com as doses crescentes de N aplicado nos estádios avaliados.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos de planta avaliados no desenvolvimento vegetativo do milho nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.

Dose N kg ha ⁻¹	Biomassa kg ha ⁻¹	N absorvido kg ha ⁻¹	NDVI	Biomassa kg ha ⁻¹	N absorvido kg ha ⁻¹	NDVI
Experimento 2010 - V6				Experimento 2011 - V6		
0	693a	20a	0,551 b	168 d	6 c	0,401b
30	867a	30a	0,617ab	210 cd	7 bc	0,410b
60	781a	23a	0,607ab	278 bc	10ab	0,451a
90	827a	32a	0,607ab	252 bcd	9 abc	0,449a
120	920a	27a	0,620ab	335ab	12a	0,450a
180	1093a	37a	0,628a	378a	12a	0,448a
CV %	18,4	23,1	4,5	11,3	12,7	2,6
Experimento 2010 - V8				Experimento 2011 - V8		
0	2040 c	59 b	0,698 b	584 b	16 c	0,453 d
30	3053 bc	62 b	0,749ab	747 ab	19 c	0,484 cd
60	2973 ab	90 ab	0,767a	935 ab	26 bc	0,534 bc
90	3200 ab	83 ab	0,765a	935 ab	29 abc	0,584ab
120	3019 ab	96 a	0,761a	1183a	37 ab	0,613a
180	3280 a	103 a	0,794a	1253a	41 a	0,611a
CV%	11,1	13,9	2,5	20,2	17,9	4,8
Experimento 2010 - V10				Experimento 2011 - V10		
0	5867 d	116 d	0,723b	882 b	22 b	0,670 c
30	6947 cd	118 d	0,746ab	998 b	24 b	0,710 c
60	7253 bc	138 cd	0,771ab	1265 b	27 b	0,759 b
90	8348ab	169 bc	0,813a	1258 b	51a	0,767ab
120	8413ab	195ab	0,813a	1467 b	49a	0,787ab
180	8667a	218a	0,825a	2218 a	65a	0,807a
CV%	5,9	9,2	3,6	19,1	17,8	2,1
Experimento 2010 - V12				Experimento 2011 - V12		
0	7667 c	145ab	0,828 d	2213b	52 b	0,697 c
30	7547 c	117 b	0,841 cd	2588b	54 b	0,801 b
60	7787 bc	173ab	0,850 bc	3208ab	67 b	0,816ab
90	8653ab	206ab	0,867ab	3858ab	105a	0,834a
120	8707ab	186ab	0,882ab	3818ab	110a	0,824ab
180	9419a	229a	0,878a	4433a	119a	0,821ab
CV%	4,3	21,4	2,1	19,3	9,1	1,4
Experimento 2010 - V14				Experimento 2011 - V14		
0	7593 c	132 b	0,829 c	2860 c	47 c	0,698b
30	8947 bc	175 ab	0,856 b	3850 bc	67 bc	0,787a
60	9853ab	177ab	0,874a	4272 b	74 bc	0,819a
90	9987ab	203ab	0,875a	5738a	114ab	0,817a
120	10120ab	191ab	0,873a	6087a	138a	0,818a
180	11027a	228a	0,885a	6108a	129a	0,822a
CV%	5,7	15,2	1,0	8,2	18,5	2,2

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.

6.5.1 Biomassa acumulada e N absorvido na parte aérea no desenvolvimento do milho em função do Nitrogênio aplicado

Na Figura 3 e 4 são apresentadas as regressões realizadas da Biomassa acumulada e o N absorvido em cada estágio nos experimentos 2010 e 2011. As relações ajustadas foram positivas e significativas nos estádios avaliados.

No estágio V6 para o Experimento 2010, ajustaram-se relações de $R^2 = 0,82$ para a biomassa com valores entre 693 e 1.093 kg ha⁻¹ e para o N Absorvido $R^2 = 0,61$ com valores entre 20 e 37 kg ha⁻¹ na menor (0 kg ha⁻¹) e maior (180 kg ha⁻¹) dose de N aplicada. Para o Experimento 2011, os ajustes nos atributos foram mais altos $R^2 = 0,92$ e $R^2 = 0,81$, apresentando-se nas mesmas doses os valores mínimos e máximos, mas sendo inferiores entre 168 e 378 kg ha⁻¹ na biomassa e 6 e 12 kg ha⁻¹ no N absorvido.

Esta diferença nos valores de biomassa acumulada e N absorvido são justificadas pela frequência das precipitações (Figura 1). No Experimento 2011, as precipitações desde a semeadura até V6 foram maiores 335 mm, mas 75% foi precipitada nos primeiros 15 DAS. Entretanto, no Experimento 2010 as precipitações foram menores de 210 mm, mas somente 5% foi nos primeiros 15 DAS, o restante de 198mm foi distribuído com boa frequência nos dias restantes até alcançar V6.

Em V8 no Experimento 2010 o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,77$ e $R^2 = 0,86$ para a biomassa acumulada e N absorvido com valores entre 2.040 e 3.280 kg ha⁻¹ e 59 e 103 kg ha⁻¹. O Experimento 2011 em V8 aumentou sua relação com a adubação de N com $R^2 = 0,93$ e $R^2 = 0,96$ para a biomassa acumulada e para o N absorvido. Valores mínimo e máximo encontrados foram de 584 e 1255 kg ha⁻¹ na produção de biomassa e absorveram 16 e 41 kg ha⁻¹ de N, sendo já bem inferiores aos encontrados no Experimento 2010, mas com a mesma tendência em resposta às doses de N aplicado.

Entre V6 e V8, verificou-se uma grande diferenciação da condição hídrica dos experimentos. Neste período, no Experimento 2010 a precipitação ocorrida foi de 219 mm e no Experimento 2011 de 5mm, que poderia justificar maior amplitude dos valores obtidos de biomassa e N absorvido neste estágio.

No estágio V10, no Experimento 2010 a relação entre a Biomassa acumulada e as doses de N aumentou sua determinação com $R^2 = 0,85$ variando entre 5.867 e

8.667 kg ha⁻¹ e o N absorvido apresentou $R^2 = 0,96$ (116 e 218 kg ha⁻¹). Para 2011, as relações foram $R^2 = 0,92$ (882 e 2.218 kg ha⁻¹) na biomassa e $R^2 = 0,96$ (22 e 65 kg ha⁻¹) no N absorvido que nas últimas doses 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ não deferiram estatisticamente (Tabela 3). Neste estádio V10 e ao comparar com V8, o Experimento 2010 duplicou o N absorvido e a biomassa acumulada nas doses de N. O tratamento sem N mostrou também elevada absorção e desenvolvimento de biomassa. No Experimento 2011 foram diferentes e somente houve aumentos dos atributos avaliados em torno de 30%. A rotação de culturas na área dos experimentos foi de soja, trigo, milho (Experimento 2010) e trigo e milho (Experimento 2011).

No Experimento 2010 e no estádio V12, relacionou-se com coeficientes de determinação de $R^2 = 0,95$ e $R^2 = 0,76$ para a biomassa (7547 e 9419 kg ha⁻¹) e N absorvido (117 e 229 kg ha⁻¹) sem demonstrar diferenças estatísticas nos primeiros tratamentos (0, 30 e 60 kg ha⁻¹). Para o Experimento 2011, as relações para a biomassa foram de $R^2 = 0,93$ com valores entre (2.213e 4.433 kg ha⁻¹) e para N absorvido foi de $R^2 = 0,87$ com valores entre 52 e 119 kg ha⁻¹. Entre o estádio V12 e V14 houve outra diferenciação nas precipitações, sendo que no Experimento 2010 neste período foi acumulado 89 mm e no experimento 2011 somente 6 mm.

Para 2010, no V14 houve elevados coeficientes de determinação e amplitude de biomassa de $R^2 = 0,86$ (7.593 e 11.027 kg ha⁻¹) e no N absorvido $R^2 = 0,85$ (132 e 228 kg ha⁻¹). No 2011, os coeficientes foram $R^2 = 0,85$ e $R^2 = 0,83$ para a biomassa acumulada e o N absorvido (47 e 129 kg ha⁻¹). Para os experimentos no V14, o valores máximo e mínimo foram com a menor (0 kg ha⁻¹) e maior (180 kg ha⁻¹) dose de N aplicado na semeadura. A produção de biomassa e o N absorvido no 2010 foram incrementos em 45 e 72 % e no 2011 aumentou em 113 e 174 % respectivamente entre os tratamentos 0 e 180 kg ha⁻¹.

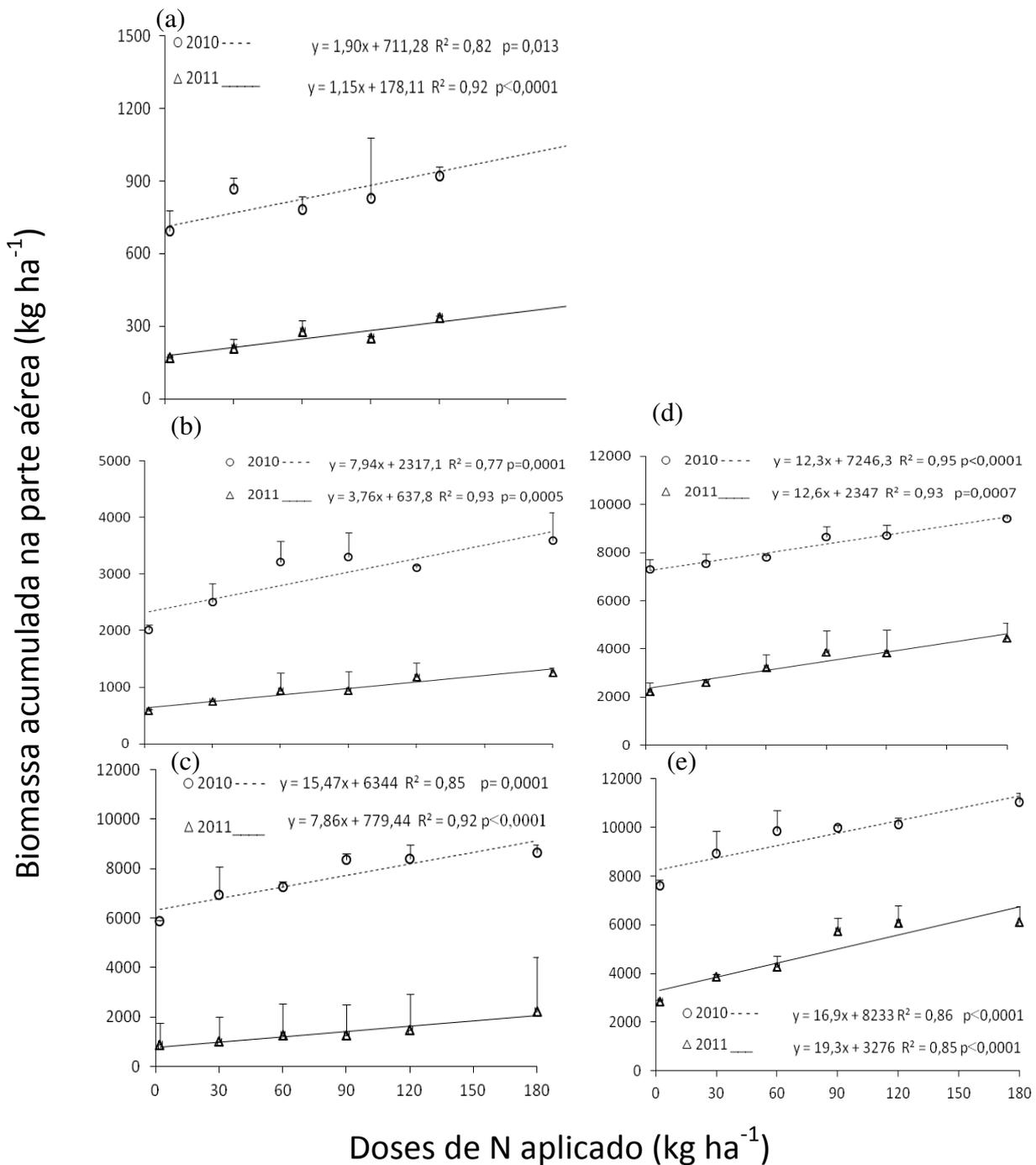


Figura 3 - Relação entre o desenvolvimento da biomassa acumulada e as doses de N aplicado no milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), Paraguai 2010 e 2011.

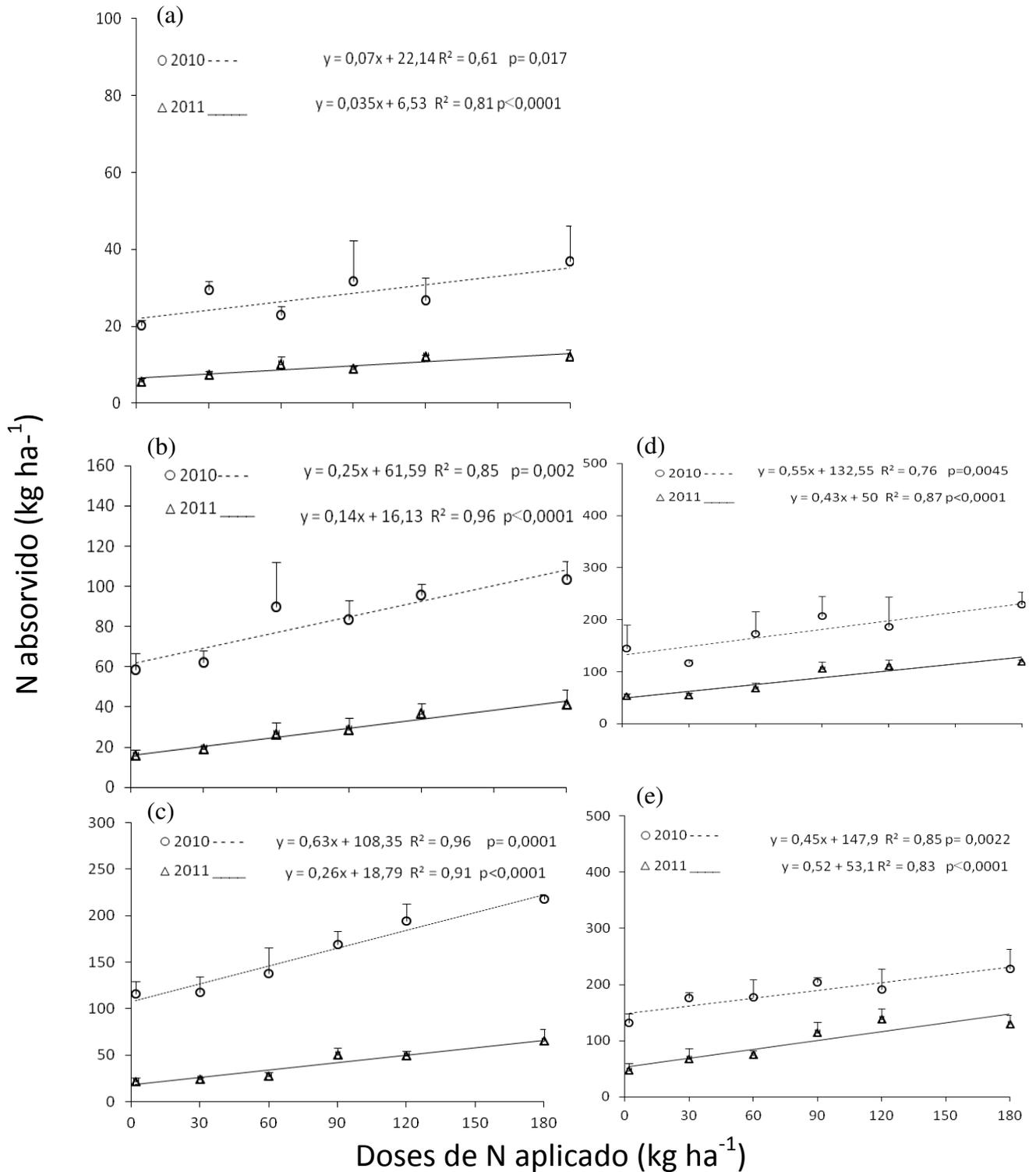


Figura 4 - Relação entre o nitrogênio (N) absorvido e as doses de N aplicado no milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), Paraguai 2010 e 2011.

6.5.2 NDVI em diferentes estádios fenológicos do milho em função das doses de nitrogênio aplicado.

Avaliando-se o desempenho do sensor de NDVI com as doses de N, foram encontradas coeficientes de determinações significativos (Figura 5). No mesmo estágio V6 foram encontradas as correlações mais baixas para os dois experimentos $R^2 = 0,53$ (2010) e $R^2=0,59$ (2011). Por outro lado, também no estágio V10 para os experimentos foram encontradas as maiores relações NDVI com as doses de N aplicado com $R^2 = 0,87$ (2010) e $R^2 =0,88$ (2011).

Os valores de NDVI foram maiores para o Experimento 2010 na comparação com o Experimento 2011. No estágio V6, os valores NDVI e os valores do Experimento 2010 variaram entre 0,551 e 0,628 na dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N, incrementado 14%. Entretanto, para o Experimento 2011, os valores foram 0,401 e 0,451 na doses 0 e 60 kg ha⁻¹ de N, incrementando sua amplitude 12%. Para o estágio V8, os valores NDVI encontrados foram de 0,698 e 0,794 com uma amplitude de 14% (Experimento 2010) na dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N. Já para o Experimento 2011, os valores variaram entre 0,454 e 0,613 equivalente em aumento porcentual de 35 % apresentando nas doses 0 e 120 kg ha⁻¹ de N.

Aumento de 14% nos valores NDVI foram encontrados no estágio V10 com 0,723 e 0,825 (Experimento 2010) na dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N e valores de 0,670 até 0,807 equivalente em aumento de 20% do NDVI no Experimento 2011 na dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N. Martin et al. (2007) encontrou resultados semelhantes com o sensor “greenseeker” no milho com baixas relações de NDVI nos estádios de V3 até V6 e um coeficiente de determinação mais elevado no estágio V10.

Para o experimento 2010 a variação do NDVI no estágio V12 (0,828 e 0,882) na dose 0 e 120 kg ha⁻¹ de N e em V14 (0,829 e 0,885) na dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N foram as mais baixas e amplitudes semelhantes de NDVI (7 %). Já para o Experimento 2011, ainda apresentou elevada variabilidade de NDVI, sendo que em V12 houve amplitude entre 0,697 e 0,834 (20 %) na dose 0 e 90 kg ha⁻¹ de N e para V14 variou entre 0,698 e 0,822 (18 %) na dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N. Nos estádios avaliados, verificou-se diferenças estatísticas, principalmente na dose 0 kg ha⁻¹ de N ao contrastar com os valores de NDVI gerados com adubação de N.

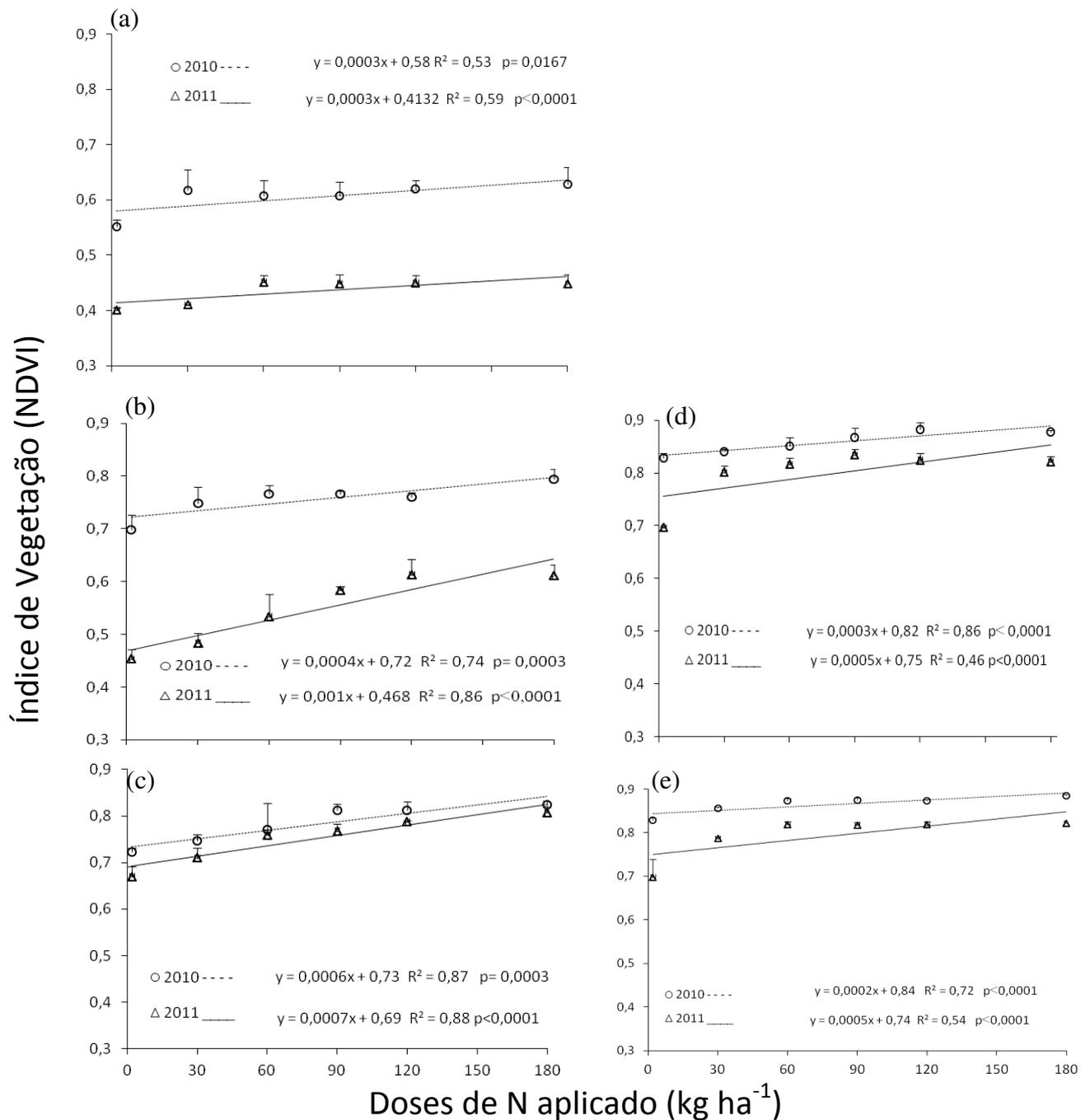


Figura 5 - Relação entre o NDVI e as doses de N aplicado no milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), Paraguai 2010 e 2011.

O NDVI em estádios avançados pode atingir a saturação em condições de elevada quantidade de biomassa. Quando existem condições de alta produtividade de biomassa, verifica-se baixa capacidade de detectar diferenças com o NDVI (GITELSON et al., 2002; RAUN, 2005b) situação encontrada na condição do

Experimento 2010 no estádio V14. Trabalhando com o “greenseeker”, Povh et al. (2008) verificaram em milho uma situação semelhante ao Experimento 2011, encontrando relações ($R^2=0,88$) de NDVI com o sensor óptico até dose de 50 kg ha^{-1} de N com leituras em 49 DAS e assim também o teor de N foliar não variou nas doses crescentes de N e na leitura tardia (66 DAS) as relações das doses de N e NDVI foram baixas ($R^2=0,11$).

Raun et al., (2002), para uso do “greenseeker” em forma prática, propõem calcular através de índice a resposta da aplicação de N que é calculada dividindo a média do NDVI de uma faixa rica de N pelo dado coletado na lavoura com a dose do produtor com o objetivo de identificar o momento em que a cultura irá responder melhor ao fertilizante. Na Figura 6, com os dados do experimento foi calculado o índice de resposta para cada estádio com a dose 180 kg ha^{-1} como faixa rica de N e a dose utilizada de N na semeadura tradicionalmente pelo produtor do Paraguai (30 kg ha^{-1} de N) .

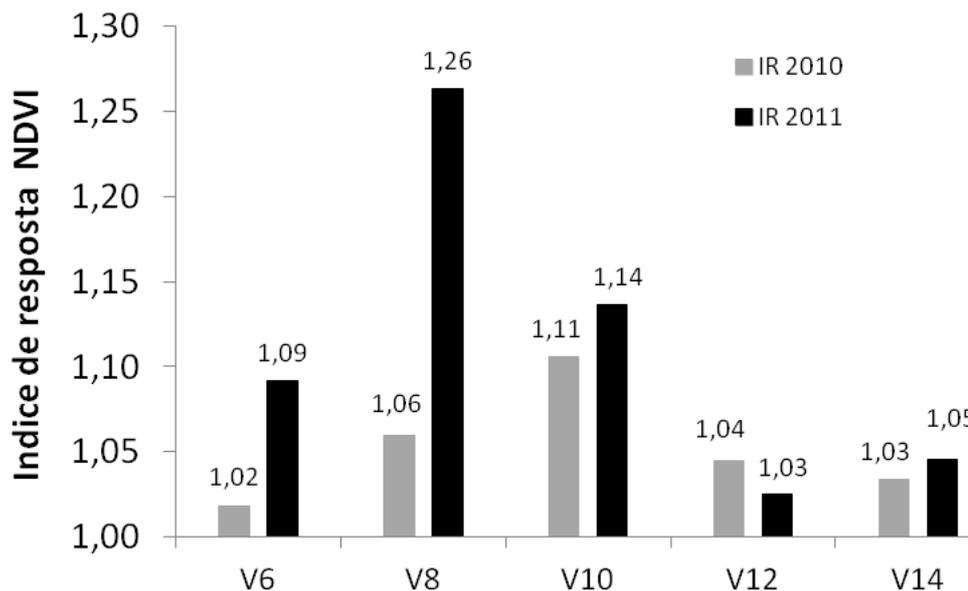


Figura 6 – Índice de Resposta de NDVI calculado entre tratamentos 180 e 30 kg ha^{-1} de N.

Analisando o índice de resposta, os melhores estádios (valores mais altos) para adubar em cobertura, visando obter o potencial desenvolvido com a faixa rica de N foram observados em V8 e V10 para os experimentos. Raun (2005a) sustentou

que quando os valores são semelhantes ou por abaixo de 1, indicam que não existe deficiência de N estimada pelos sensor óptico e o potencial de resposta à adubação é baixa.

6.5.3 Utilização do sensor óptico ativo na estimativa da nutrição nitrogenada e na caracterização do potencial produtivo do milho

Avaliando o desenvolvimento do milho com as adubações de N e as leituras do sensor óptico “greenseeker”, primeiramente é necessário associar as relações existentes em cada estágio do milho com parâmetros fitotécnicos associados na estimativa nutricional de N como a biomassa acumulada na parte aérea e a produtividade de grãos com o N absorvido pelo milho. A formação de grãos na cultura do milho está estreitamente relacionada com a translocação de açúcares (CRAWFORD et al., 1982) e de N (KARLEN et al., 1988) das folhas para os grãos. Desta forma, a produtividade de grãos está diretamente relacionada com a área foliar fotossinteticamente ativa da planta. Folhas bem nutridas em N têm maior capacidade de assimilar CO₂ e sintetizar carboidratos durante a fotossíntese, resultando em aumento da biomassa acumulada na parte aérea e em maior produtividade de grãos.

Na Figura 7, apresentam-se as relações entre a biomassa acumulada na parte aérea como variável dependente do N absorvido obtido nos tratamentos dos experimentos 2010 e 2011. No Experimento 2010 e 2011, ajustaram-se regressões lineares positivas significativas nos estádios avaliados. Entretanto, as maiores relações de $R^2 = 0,87$; $p < 0,0001$ (Experimento 2010) e $R^2 = 0,88$; $p < 0,0001$ (Experimento 2011) foram encontrados inserindo os valores de todos os estádios avaliados em uma regressão geral indicando uma proporcional relação da biomassa acumulada na parte aérea e o N absorvidos avaliados em diferentes estádios fenológicos do milho (Figura 7f). Entre os parâmetros de planta, as avaliações relacionadas à folha (massa seca, área foliar) e a intensidade de cor verde do dossel parecem ser mais adequadas para a decisão sobre a quantidade de N a ser aplicada em relação aos testes de N no tecido, devido à menor variação entre os valores obtidos (SCHRÖDER et al., 2000).

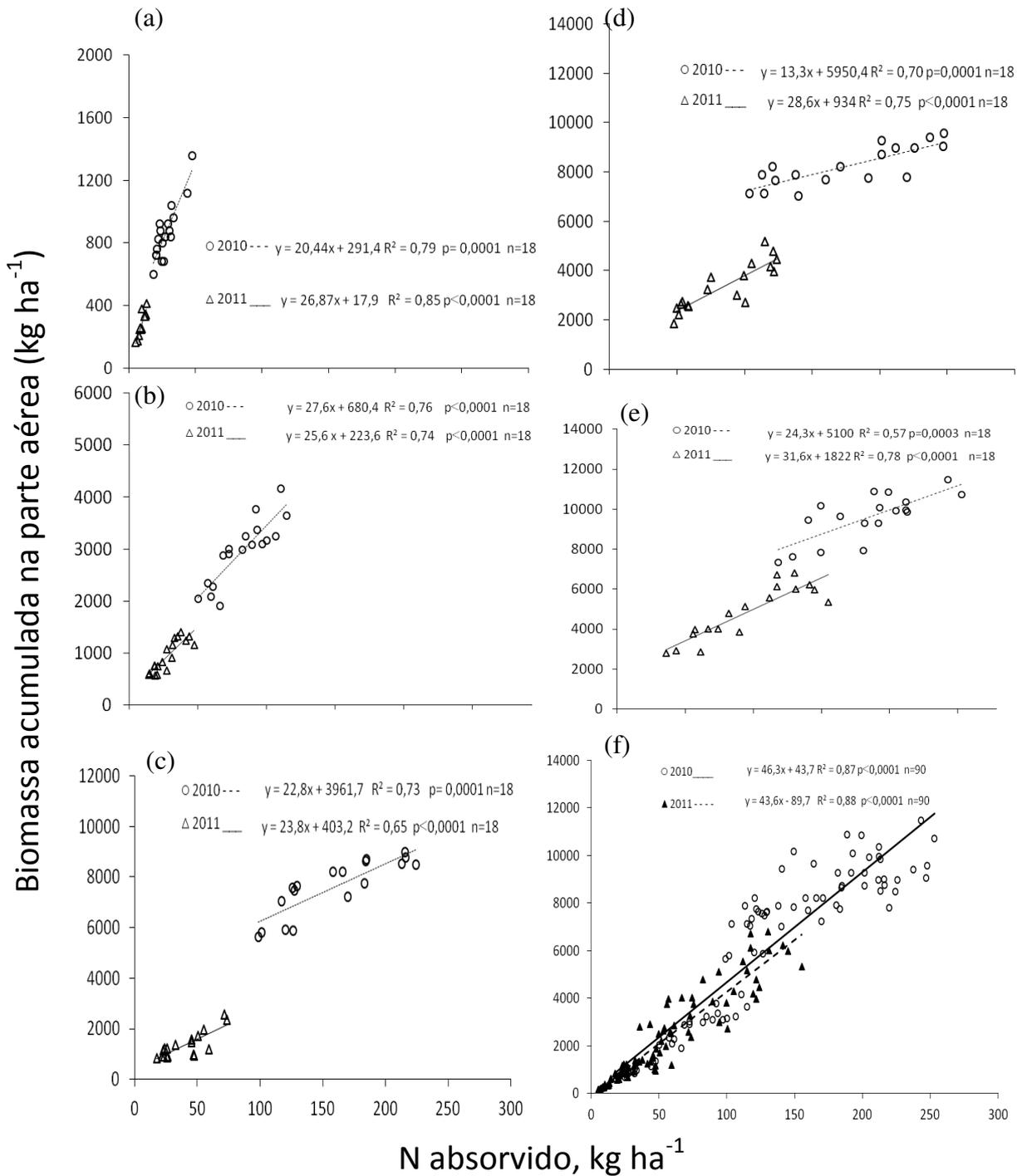


Figura 7 – Correlação entre o N absorvido e biomassa acumulada na parte aérea obtido nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), V6-V14(f) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.

Raun, et al. (2005b) reportaram que em V6 as plantas iniciam um rápido desenvolvimento vegetativo em que em aproximadamente 30 dias as folhas cobrem as entrelinhas dos cultivos e observa-se que o solo exposto diminui e a massa verde

aumenta, conseqüentemente os valores do NDVI obtidos são maiores. Assim, também nos estádios superiores V10 e V12 e com alto desenvolvimento vegetativo existe a possibilidade de detectar baixas diferenças entre as plantas.

A figura 8, que relaciona os dados de biomassa como variável dependente do NDVI, demonstra que no estádio V6 o coeficiente de determinação foram os valores mais baixos encontrados para o Experimento 2010 ($R^2 = 0,34$) e para o Experimento 2011 ($R^2 = 0,53$). Já em V8, observou-se um aumento nos valores do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,44$) e ($R^2 = 0,64$). Os maiores valores de coeficiente de determinação foram encontrados nos estádios V12 e V14 ($R^2 = 0,71$ e $R^2 = 0,80$) e no Experimento 2011 as mais altas foram em V8 e V10 ($R^2 = 0,64$ e $0,59$).

Analisando a regressão realizada com os dados totais de V6 até V14 (Figura 8f) para o Experimento 2010 existiu a mais elevada relação com $R^2 = 0,81$; $p < 0,0001$ e a maioria dos tratamentos que foram adubados com doses de N apresentaram valores de NDVI, nos estádios V12 e V14, acima de 0,850 devido ao maior acúmulo de biomassa. Entretanto, na regressão do Experimento 2011 o valor do coeficiente de determinação foi menor $R^2 = 0,61$; $p < 0,0001$, além de que a amplitude de variação de NDVI foi maior situando-se entre 0,700 e 0,820. Nos experimentos existiu uma diferenciação estatística significativa nos valores NDVI entre o tratamento sem N e os tratamentos com doses de N. Raun et al., (2005b) encontraram semelhanças nas determinações de NDVI na biomassa de milho com valores médios de NDVI de 0,380; 0,760; 0,790; 0,770 em V6, V8, V10 e V12 respectivamente e os CV mais baixos das leituras foram encontradas em V10 e V12. Martin et al., (2007) não encontraram significância entre NDVI e a biomassa nos estádios iniciais até V6 ($R^2 = 0,19$), porém com o avanço do desenvolvimento vegetal atingiu valores máximos entre V8 ($R^2 = 0,66$), V10 ($R^2 = 0,64$) e V12 ($R^2 = 0,59$).

Para o Experimento 2010 houve saturação do NDVI nos últimos estádios avaliados V12 e V14, provavelmente devido aos valores altos de biomassa acumulada. Para as doses 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N para o Experimento 2011, verificou-se resultados NDVI semelhantes que estariam associados à quantidade de N absorvido pela restrição hídrica existente.

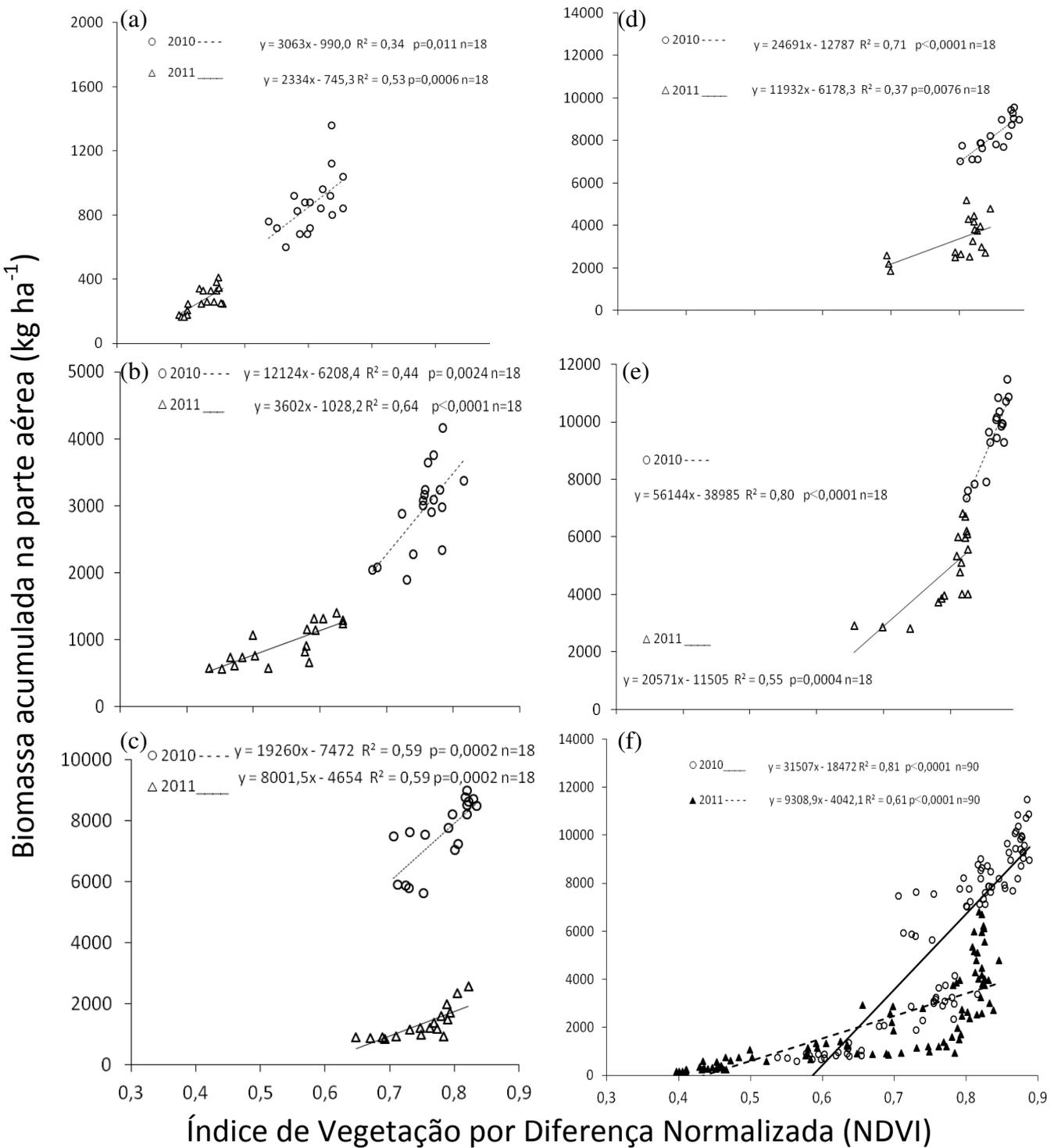


Figura 8 – Correlação entre o NDVI e a biomassa acumulada do milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e), V6-V14 (f) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.

Raun et al.,(2011) afirmaram que o milho é dependente do N para obter o potencial produtivo, assim também que o potencial de produção se altera de um ano

para outro por variáveis não controláveis como as climáticas. A solução promissora é melhorar a eficiência na recomendação de N, em que existe a necessidade de gerar dados regionais com a capacidade de estimar tanto a resposta de N do cultivo e também seu potencial produtivo para cada situação climática que gera uma EUN variável e com isso ajustar doses de N em cobertura.

A relação entre o NDVI e o N absorvido é apresentada na Figura 9. Foi observada nas regressões que no V6 coeficientes de determinação baixos que aumentando no desenvolvimento vegetativo. Analisando os dois experimentos de forma conjunta, os melhores coeficientes de determinação foram encontrados no V10 com $R^2 = 0,66$ e $R^2 = 0,65$ para o Experimento 2010 e 2011, respectivamente. Quando todos os dados obtidos entre V6 e V14 foram ajustados com regressões, as relações foram altas e significativas com $R^2 = 0,78$; $p < 0,0001$ para o Experimento 2010 e $R^2 = 0,64$; $p < 0,0001$ para o Experimento 2011. Situação que indica que o milho absorveu N em forma proporcional aos valores em aumento de NDVI, sendo que o sensor óptico estimou bem o estado nutricional de N na planta.

Freeman et al. (2007), encontrando dados semelhantes em experimentos de longa duração $R^2 = 0,61$, relacionando o N absorvido como variável dependente do NDVI em V10 até R1, relataram que a detecção da deficiência de N em forma rápida e em estádios mais avançados como V10 e V12 possibilita ajustar a dose do fertilizante nitrogenado de acordo ao desenvolvimento da cultura, reduzindo riscos de perdas do nutriente parcelando o N em taxa variável.

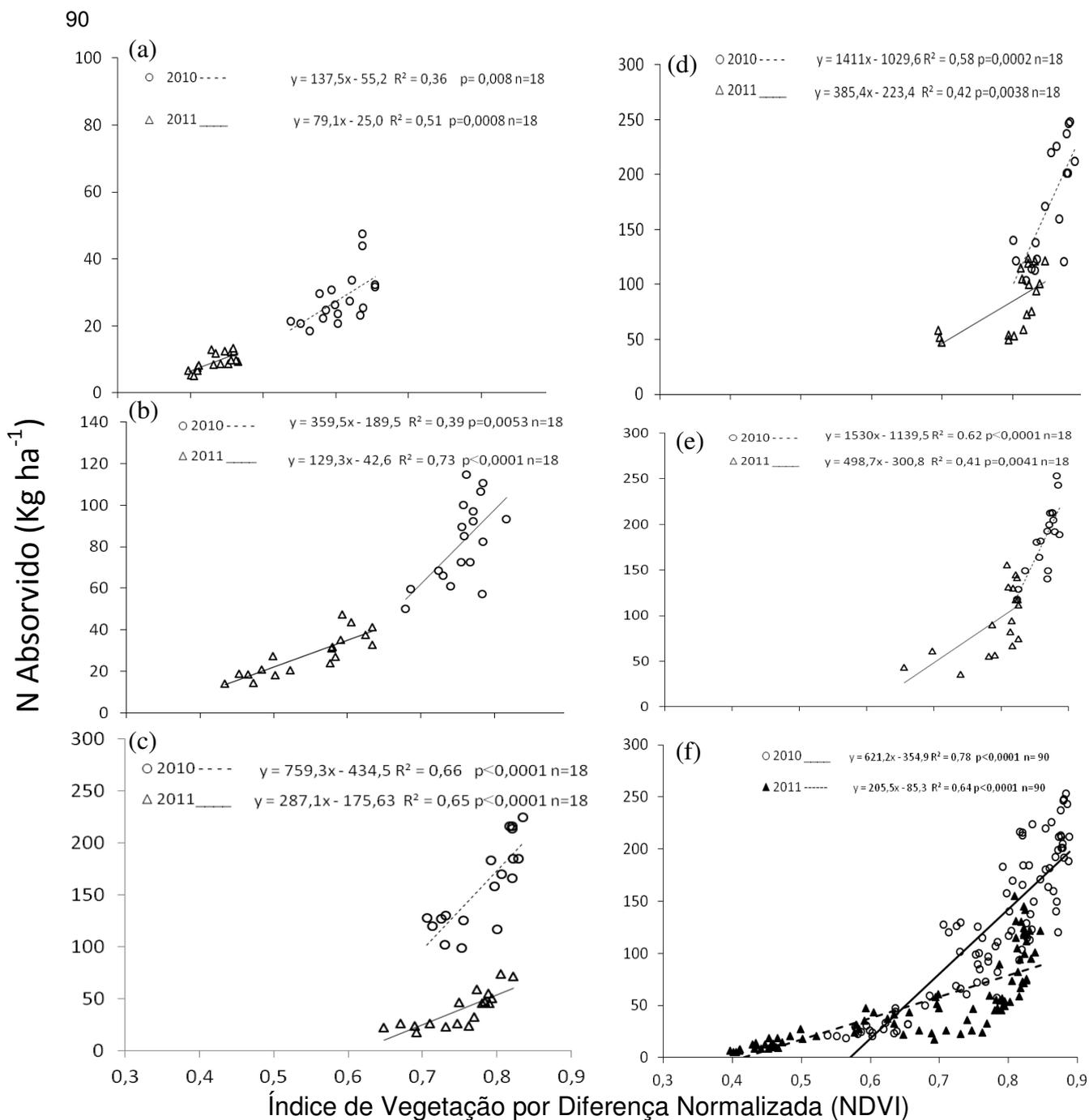


Figura 9 – Correlação entre o NDVI e o N absorvido do milho nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e) V6-V14 (f) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.

Pesquisas nos EUA reportaram relações elevadas na utilização do NDVI para estimar a produtividade de grãos de milho (INMAN et al., 2007; MARTIN et al., 2007; SOLARI et al. 2009; TEAL et al., 2006). Na Argentina, experimentos de longa duração com leituras NDVI com o “greenseeker” também foram realizados,

indicando que entre os estádios V8 até V12 as medições são mais eficientes na estimativa do estado nutricional e da produtividade de milho (MELCHIORI, 2010).

Na Figura 10, apresentam-se as relações com as doses de N e a diferença existente de um ano para o outro na produtividade do milho causada pelas condições hídricas diferenciadas nos experimentos. A partir de V14 até o enchimento de grãos e a maturação fisiológica do milho, houve 294 mm de precipitações para o Experimento 2010 e somente 135 mm no Experimento 2011, que já tinha suportado restrições de água entre V6 e V14, situação que foi transformada em decréscimo da produtividade de grãos. Nas melhores condições hídricas houve uma resposta significativa até a dose 180 kg ha⁻¹ de N com produtividades entre 8.476 até 13.157 kg ha⁻¹ equivalente em 55 % de incremento com a fertilização nitrogenada. Nas condições com restrições hídricas no experimento 2011, ajustou-se uma regressão quadrática com resposta significativa somente até a dose 60 kg ha⁻¹ de N aplicado e com produtividades inferiores que variaram entre 3.179 e 4.994 kg ha⁻¹ de grãos de milho com as doses de N aplicadas.

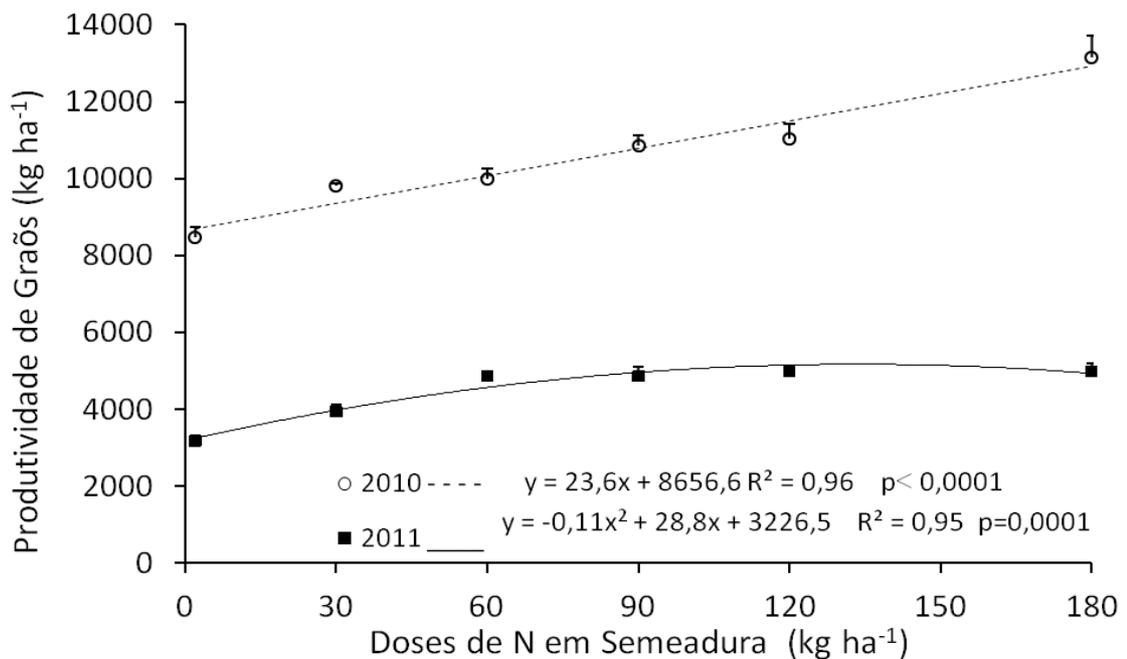


Figura 10 - Produtividade de grãos de milho em função de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai, Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.

No experimento 2011 com a dose 60 kg ha^{-1} existiu incremento de 53% em comparação ao tratamento sem N. Já no experimento 2010 com a mesma dose de 60 kg ha^{-1} verificou-se incremento de produtividade de grãos de semente de 18%. Hurtado et al. (2009) justificaram altos rendimentos de milho sem N pela alta mineralização da matéria orgânica e o suprimento do estoque natural de N do solo. Provavelmente, no experimento 2010 as melhores condições de clima, uma elevada mineralização da palhada da soja e trigo provenientes do histórico de rotação de culturas disponibilizaram N necessário para o milho atingir alta produtividade sem N aplicado.

Por outro lado o teor de N nas folhas é muito influenciado pela adubação nitrogenada e, segundo Killorn e Zourarakis (1992), a concentração foliar de N reflete sua disponibilidade no solo, sendo que a sua análise pode ser útil na detecção de deficiência de N e, conseqüentemente, na predição da produtividade de grãos.

Na Figura 11 relacionou-se a produtividade de grãos como fator dependente do N absorvido no desenvolvimento vegetativo do milho sendo ajustadas regressões lineares positivas nos estádios avaliados. No experimento 2010 houve maiores absorções de N e produtividades em comparação com o experimento 2011, que são explicadas pelas condições hídricas diferenciadas nas safras dos experimentos.

O experimento 2010 apresentou o maior coeficiente de determinação no estádio V10 com $R^2 = 0,67$; seguido por V8 e V14 com $R^2 = 0,50$ e $R^2 = 0,41$ respectivamente. Para o experimento 2011 no estádio V6 mostrou a maior relação com $R^2 = 0,62$; seguido de V8 com $R^2 = 0,57$ e no V12 e V14 apresentaram relações com o mesmo valor de coeficiente de determinação de $R^2 = 0,53$ (Figura 11).

Nos experimentos foram encontrados menores valores de coeficientes de determinação estimando a produtividade com o N absorvido ao comparar com as relações maiores verificadas em relação à biomassa acumulada (Figura 7) e o NDVI (Figura 9) em função do N absorvido. Cantarella (1993) relata que, embora a absorção do N pelo milho seja mais intensa aos 40 a 60 dias após emergência, a planta ainda absorve aproximadamente 50% do N necessário após o início do florescimento que podem explicar as relações mais baixas encontradas com a produtividade de grãos e o N absorvido avaliado nos estádios fenológicos de V6 até V14. Segundo Silva et al. (2005) as alterações morfo-fisiológicas introduzidas nos

híbridos modernos de milho sugerem mudanças na dinâmica de absorção do N, aumentando a habilidade da planta de absorvê-lo durante o enchimento de grãos e indicaram gerar pesquisas para obter recomendações de adubações de coberturas nitrogenadas tardias sempre que não existam restrições climáticas para a absorção de N durante a formação de grãos.

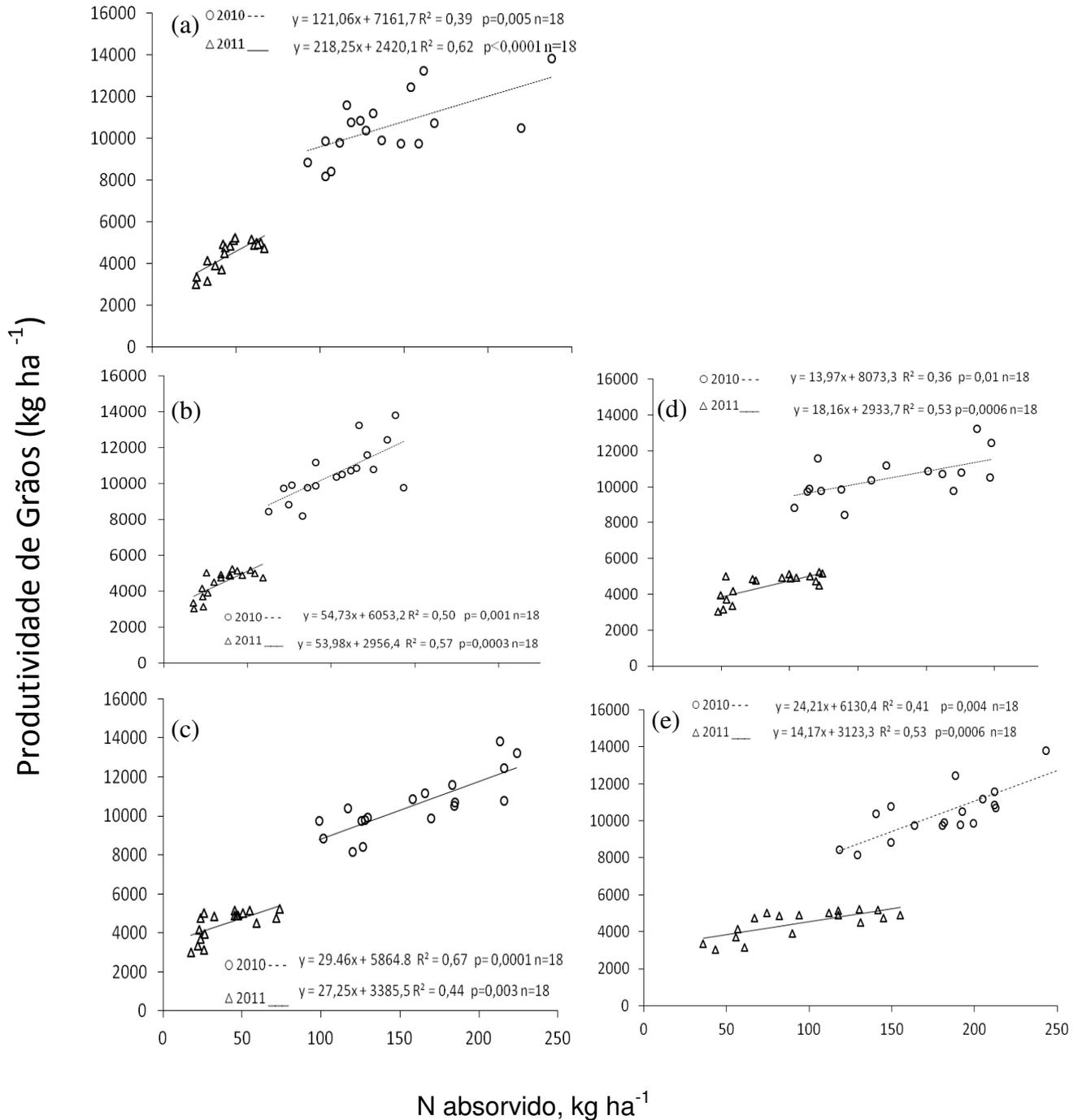


Figura 11 – Correlação entre o N absorvido e produtividade de grãos obtido nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.

Na Figura 12 foram estimados a produtividade de grãos como valor dependente dos valores de NDVI. Os resultados mostram regressões lineares positivas e significativas. No estádio V6 foram encontrados os ajustes mais baixos para as leituras NDVI com a produtividade do milho sendo $R^2 = 0,40$ para o experimento 2010 e $R^2 = 0,71$ para o experimento 2011. Já no estádio V14, foram encontradas as relações mais altas com $R^2 = 0,69$ para o experimento 2010 e $R^2 = 0,83$ para o experimento 2011. Em todos os estádios avaliados existiram relações mais altas para o experimento 2011 mesmo com baixas produtividades e também foi observado que no V12 e V14 os pontos pertencentes ao tratamento sem N, ficaram com diminuição em NDVI e produtividade, afastado dos tratamentos com doses de N (Figura 12).

Clay et al. (2006) demonstraram que nos estádios V8 e V9 as adubações baseados no sensor NDVI foram mais eficientes do que as tradicionais recomendações de N pela expectativa de produtividade de milho. Martin et al. (2007) reportaram semelhanças aos resultados dos experimentos desta pesquisa, nas relações de produtividade de grãos e NDVI no milho, verificou-se em V6 valor baixo de $R^2 = 0,28$ e aumentou sua capacidade de estimar a produtividade de grãos em estádios avançados como V10 e V12 ($R^2 = 0,56$; $R^2 = 0,64$). Assim também, as pesquisas de Inman et al. (2007) com doses de N reportaram capacidade de estimar com o “greenseeker” a produtividade de milho com $R^2 = 0,65$ e sugeriu aumentar pesquisas com uma faixa rica de N e outra sem N, para encontrar a época crítica em cada safra com o sensor óptico e realizar intervenções com a fertilização nitrogenada para diminuir a variabilidade na produtividade. Teal et al. (2006) demonstraram também dados semelhantes aos encontrados neste trabalho com elevados coeficientes de determinação em estádios V7 e V9 entre a produtividade de grãos de milho e o NDVI. Solari et al. (2008) indicaram necessidade de avaliar os resultados de maiores condições edafoclimáticas para desenvolver algoritmos que traduzam leituras do sensor em recomendação de N em cobertura para cada região.

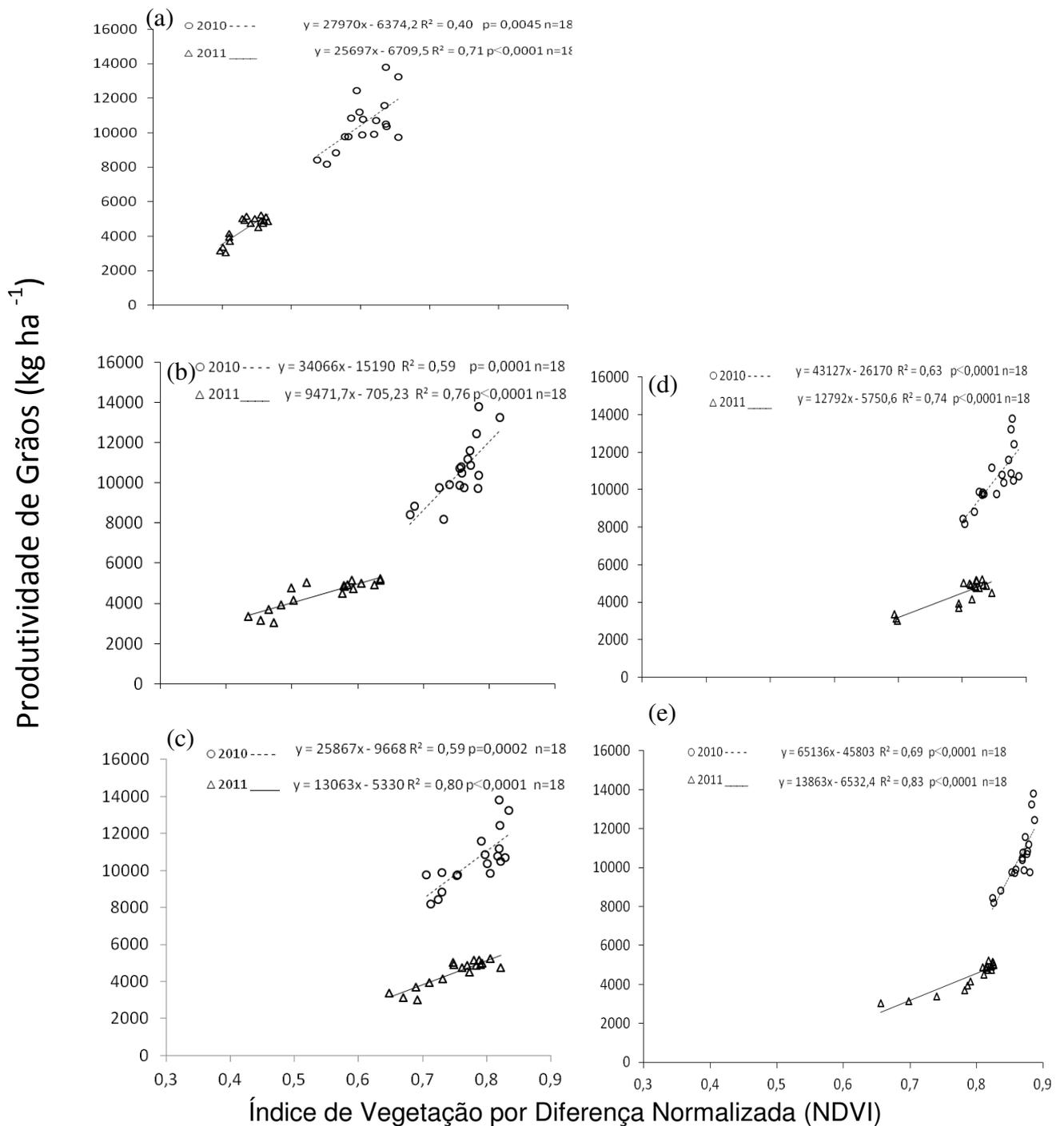


Figura 12 – Correlação entre o NDVI e a produtividade de grãos obtido nos estádios V6 (a), V8 (b), V10 (c), V12 (d), V14 (e) em função das doses de N aplicado nos experimentos 2010 e 2011, Paraguai.

Segundo relatos de Melchiori (2010) os resultados obtidos na Argentina revelaram aumentar o período da aplicação de N em milho até estádios avançados desde V8 até V14 com o uso do sensor óptico. Ampliação de épocas de adubação N

em cobertura representam benefícios agrônômicos e econômicos, pois se incrementa a capacidade de intervenção em estádios mais próximos aos períodos de maior necessidade de N com possibilidade de adubar em forma diferenciada e variando as doses de acordo ao diagnóstico NDVI do talhão, isto implica melhoria da eficiência do uso do N e diminuição da quantidade de N aplicado e menores perdas do nutriente, com resultados semelhantes em produtividade aos obtidos com a aplicação total de N em semeadura.

6.6 Conclusões

Os valores de NDVI em função das doses de N apresentaram relações positivas significativas com suas variáveis dependentes de biomassa acumulada na parte aérea, N absorvido e a produtividade de grãos do milho.

Nas condições do experimento 2010 verificou-se no estádio V10 a maior amplitude de resposta de NDVI (0,723 até 0,825) com as doses de N e houve respostas lineares em produtividade de grãos até a dose 180 kg ha⁻¹. O sensor óptico saturou em V12 e V14 com as doses maiores de N (90, 120 e 180 kg ha⁻¹). Para o Experimento 2011, devido à restrição hídrica, verificou-se menor desenvolvimento vegetativo do milho e valores de NDVI com maior amplitude (0,670 até 0,834) nos estádios V10 e V12 respectivamente, com respostas em produtividade de grãos somente até 60 kg ha⁻¹ de N.

O sensor óptico nas condições climáticas diferenciadas possibilitou a detecção do estado nutricional do milho apresentando maiores respostas em V8, V10 e V12, surgindo assim épocas para gerar pesquisas sobre eficiência da adubação de N visando recomendações de N em cobertura tardia com a utilização de técnicas de espectroscopia óptica.

6.7 Referências

BREDEMEIER, C. Como melhorar a eficiência de uso do nitrogênio em cereais de estação fria. In: CASTRO A. et al.,(Org). **Limitaciones para la productividad de trigo y cevada**. Montevideo, Uruguay. 2011. p. 69-81.

CLAY, D.E; KIM, K.I; CHANG, J; CLAY, S.A; DALSTED, K.Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. **Agronomy Journal**, v.98, p.579-587, 2006.

CRAWFORD, T.W;RENDING, v.v. & BROADBENT, F.E. Sources, fluxes, and sinks nitrogen during early reproductive growth ofmaize (Zea mays L.) **Plant Physiology**, 70:1654-1660, 1982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa – SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

FERREIRA, D. F. **Programa Sisvar.exe**: sistema de análise de variância. Lavras: UFLA, 2010.

FREEMAN, K.W; GIRMA, K; ARNALL, D.B;; MULLEN, R.W; MARTIN, K.L;; TEAL, R.K., RAUN, W.R. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. **Agronomy Journal**. 99, 530-536. 2007.

GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remotesquantifi cation of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v.161, p.165-173, 2004.

GROHS, D. S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M.; POLETTO, N. **Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker**. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.1, p.101-112, 2009.

HURTADO, S. M. C; RESENDE, A. V. de; SILVA, C.A. da; CORAZZA, E.J.; SHIRATSUCHI, L.S. Variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.300-309, 2009.

INMAN, D., KHOSLA, R., REICH, R. M., & WESTFALL, D. G. (2007). Active remote sensing and grain yield in irrigated maize. **Precision Agriculture**, 8, 241–252.

KARLEN, D.L.; FLANNERY, R.L. & SADLER, E.J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. **Agronomy Journal**. 80:232-242, 1988.

KILLORN, R.; ZOURARAKIS, D. Nitrogen fertilizer management effects on corn grain yield and nitrogen uptake. **Journal of Production Agriculture**, v.5, p.142-148, 1992.

KÖPPEN, W. 1931. **Climatologia**. Buenos Aires, Fondo de Cultura Económica.

LIU, W.T.H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Editora Uniderp, 2007. 908 p.

MARTIN, K. GIRMA, K.W. FREEMAN, R.K. TEAL, B. TUBAN' A, D.B. ARNALL, B. CHUNG, O. WALSH, AND W.R. RAUN, Expression of Variability in Corn as Influenced by Growth Stage Using Optical Sensor Measurements. **Agronomy Journal**. 99:384–389 (2007).

MARTIN K., RAUN W; SOLIE J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height, **Journal of Plant Nutrition**, 35:9, 1429-1439 (2012).

MELCHIORI, R.J.M. Sensores remotos para el manejo del nitrógeno. In: **Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas**, 9., 2010, Manfredi. Anais... Córdoba: INTA, 2010. p 215-220.

MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; CHIAVEGATO, E. J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.2, p.137-145, 2009.

NTech Industries. Model 505 GreenSeeker **TMhand held optical sensor unit operating manual (Rev. G)**. NTech Industries, Inc. 740 South State Street, Ukiah, CA 95482, USA. (2005).

PORTZ, G.; MOLIN, J.P. & JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**., 13:33-44, 2012.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.8, p.1075-1083, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, n.3,p.357;363,1999.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG,H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 36, 2759-2781. 2005a.

RAUN, W.R., J.B. SOLIE, K.L. MARTIN, K.W. FREEMAN, M.L. STONE, G.V.JOHNSON, R.W. MULLEN. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. **J. Plant Nutrition**. 28:173–182. 2005b.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1993. 21p. (Special Report, 48).

ROUSE, J.W., R.H. HAAS, J.A. SCHELL & D.W. DEERING. 1973. **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS**. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 301-317.

SALL, J.; CREIGHTON, L.; LEHMAN, A. **JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software**. 3rd ed. Cary: Duxbury Press, 2005. 580p.

SCHRÖDER, J. J.; NEETESON, J. J.; OENEMA, O.; STRUIK, P. C. Does **the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production?** Reviewing the state of the art. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 151-164, 2000.

SILVA P R F; STRIEDER M L; COSER R P; RAMBO L; SANGOI L; ARGENTA G; FORSTHOFER E L; SILVA A (2005). Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. **Scientia Agrícola**. (Piracicaba, Braz.) vol.62 (5).

SOLARI, F., J. SHANAHAN, R. FERGUSON, J. SCHEPERS, AND A. GITELSON. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*. 100:571-579. 2008.

TEAL, R. K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K. W.; ARNALL, D.B.; WALSH, O.; RAUN, W. R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agronomy Journal*, v.98, p.1488-1494, 2006.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2a edição. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174 p. 1995.

TUMBO, D. S.; WAGNER, D. G.; HEINEMANN, P. H. **Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels**. Transactions of the ASAE v.45, n.3, p.815-823, 2002.

WRIGHT, D. L.; RASMUSSEN, V. P.; RANSEY, R. D.; BAKER, D. J.; ELLSWORTH, J. W. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience and Remote Sensing**, v.41, n.4, p.287-300, 2004.

7 ARTIGO 3: EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA DE COBERTURA TARDIA DO MILHO VISANDO AO USO DO SENSOR ÓPTICO ATIVO NO PARAGUAI

7.1 Resumo

Na cultura de milho, deve-se considerar alguns importantes fatores relacionados à otimização do uso do nitrogênio (N), tais como: dose certa e as épocas de aplicação, que devem ser investigados regionalmente, de modo a reduzir perdas e obter melhores práticas, aumentando a eficiência de uso de N (EUN). Assim, com o mesmo propósito, há o estudo e a validação de tecnologias, como o uso de sensores óticos e sua relação com o estado nutricional do milho. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a EUN e a produtividade do milho com combinações de adubação de N em semeadura com doses variáveis de N em cobertura tardia visando ao uso de sensor óptico ativo. Foram aplicados doses de N em semeadura 0, 30, 60, 90, 120 3 180 kg ha⁻¹ de N visando criar diferentes condições de estado nutricional e assim obter diferentes níveis de NDVI medidos com sensor óptico “Greenseeker” e comparar sua relação com a biomassa acumulada na parte aérea e de N absorvido. A inserção de subparcelas com doses de N em cobertura de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ em V8 e uma dose de 60 kg ha⁻¹ em V12 foram alocadas experimentalmente nas parcelas com doses de 0, 30, 60 e 180 kg ha⁻¹ de N em semeadura. Além disso, foi calculado no experimento a EUN através de índices agronômicos com as aplicações de N em cobertura tardia (V8 e V12) e contrastado às combinações possíveis nas doses de 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N total aplicado. Os resultados verificaram que o sensor óptico é uma ferramenta para diagnosticar o estado nutricional do milho nos estádios V8 e V12. Assim, também, as adubações em cobertura tardia (V12) não provocaram decréscimo na produtividade de grãos quando foram combinadas com N na semeadura e apresentaram uma maior EUN. O parcelamento de N demonstrou melhores EUN que as combinações sem N aplicado em semeadura ou cobertura.

Palavras-chave: nitrogênio, *Zea mays*, sensoriamento óptico.

7.2 Abstract

NITROGEN FERTILIZATION EFFICIENCY OF LATE COVERAGE OF CORN IN ORDER TO USE THE ACTIVE OPTICAL SENSOR IN PARAGUAY

In corn culture, it should be consider some important factors related to optimizing the use of nitrogen, such as: the right dose and right time of application, which should be investigated regionally in order to reduce losses and best practices, increasing efficiency nitrogen use. Thus, for the same purpose, there is the study and validation of technologies such as the use of optical sensors and its relationship to the nutritional status of corn. This study aims to evaluate the efficiency nitrogen use and corn yields with fertilizer combinations of N fertilization on seeding with varying doses of nitrogen in late aiming to using active optical sensor. Different doses of N in sowing N 0, 30, 60, 90, 120, 3180 kg ha⁻¹ in order to create different conditions of nutritional status and thus obtain different levels of NDVI measured with optical sensor "Greenseeker" and to compare its relationship with biomass accumulated in shoots and absorbed N. The insertion of subplots with N doses in the 0, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹ in V8 and a dose of 60 kg ha⁻¹ in V12 were placed in experimental plots with doses of 0, 30, 60 and 180 kg ha⁻¹ of N at seeding. Furthermore, the experiment was calculated using indices of efficiency nitrogen use with agronomic applications of nitrogen in late (V8 and V12) and contrasted the possible combinations at doses of 60, 90 and 120 kg ha⁻¹ of total N applied. The results found that the optical sensor is a tool to diagnose the nutritional status of corn in V8 and V12 stages. So, too, the coverage late in fertilization (V12) caused no decrease in grain yield when they were combined with N at seeding and had a higher efficiency nitrogen use. The splitting of N showed better efficiency nitrogen use that combinations without N applied at planting or hedge.

Keywords: nitrogen, *Zea mays*, optical sensing.

7.3 Introdução

Uma das variáveis determinantes na produtividade do milho é o fornecimento e a absorção do N, sendo de importância por participar da composição dos aminoácidos, clorofila e muitas enzimas essenciais estimulando o desenvolvimento da biomassa, do sistema radicular e dos grãos (MALAVOLTA, 2006).

O manejo da adubação nitrogenada deve suprir a demanda da planta nos períodos críticos e minimizar o impacto no ambiente pela redução de perdas (FERNANDES; LIBARDI, 2007). A dose e a época de aplicação do nitrogênio têm efeito marcante, tanto sobre a produtividade das culturas, quanto sobre a contaminação ambiental e as perdas econômicas por baixa eficiência do uso do fertilizante. Devido às suas transformações no solo, o N é um elemento muito dinâmico, o que tem gerado muitas controvérsias e discussões com relação à sua época de aplicação no milho existindo trabalhos favoráveis na aplicação total do N antecipado na semeadura do milho (SÁ, 1996; CERETTA et al., 2002) e outros com benefícios no parcelamento de N em cobertura (MAR et al., 2003; SILVA et al., 2005a) e pesquisas que não encontraram diferenças entre fornecer o total de N em semeadura e parcelar a dose N na cobertura (SOUZA et al. 2001).

O parcelamento da época de aplicação do adubo nitrogenado constitui-se em alternativas para aumentar a eficiência da adubação com N pela cultura do milho e mitigar as perdas. Isso é respaldado pelo maior aproveitamento do N, resultante da sincronização entre as aplicações e o período de alta demanda do nutriente (AMADO et al., 2002; SILVA et al., 2005b).

A taxa de absorção de N aumenta proporcionalmente ao aumento do crescimento da planta até atingir seu pico máximo entre o início do florescimento e o início do enchimento de grãos (FORNASIERI-FILHO, 2007). Cantarella (1993) cita que, embora a absorção do N pelo milho seja mais intensa dos 40 aos 60 dias após a emergência, a planta ainda absorve cerca de 50% do N de que necessita após o início do florescimento. O autor afirma que é provável que haja vantagens em uma aplicação tardia de parte do N nos casos de aplicação de doses altas de fertilizantes, solos muito arenosos ou áreas irrigadas.

Compreender os efeitos impostos pela aplicação de N tardia no milho é importante para melhorar as recomendações de adubação de N e assim também

diagnosticar o estado nutricional no momento da adubação em cobertura vegetativa para aumentar ou diminuir as doses de N (BINDER et al., 2000).

Recentes trabalhos têm mostrado resposta do milho à adubação tardia. Scharf et al. (2002) encontraram que a adubação nitrogenada tardia (V11 até V16) não resultou em perdas significativas de produtividade para o milho, mas verificaram acréscimos na eficiência do uso do N (EUN) e conseqüentemente uma economia na adubação e menores perdas ambientais. Silva et al. (2005b) verificou que o impacto da fertilização nitrogenada no espigamento com 50 kg ha⁻¹ de N foi maior quando se aplicou em combinação com uma baixa dose de N (30 kg ha⁻¹) na fase de desenvolvimento vegetativo. Neste trabalho, houve incrementos de aproximadamente 40% na produtividade de grãos obtidos com adubação de N em cobertura tardia e deveram-se principalmente a maior quantidade proteína e ao maior peso de grãos.

Na Argentina, Melchiori (2010) com adubação de cobertura tardia, demonstrou melhoria na EUN no milho, alertando que sua alta eficiência depende da entrada de água no sistema pós-aplicação, seja por precipitações ou irrigações, já que é necessária incorporação e absorção rápida do N adubado em estádios superiores e que as técnicas de sensoriamento remoto para monitorar a nutrição nitrogenada auxiliam na adubação de N em taxa variável.

Raun et al. (2002) demonstraram que as avaliações de dossel usando o sensor ativo GreenSeeker (NTech Industries, 2005) poderiam ser utilizadas para doses variáveis de N em cobertura das poáceas, demonstrando melhoraria na EUN. Assim, também torna-se importante a pesquisa e a avaliação dos índices agronômicos que avaliam a EUN em cada região, buscando, em nível mundial, melhores práticas de manejo de N e com isso obter a demanda de grãos do futuro com um equilíbrio de entrada e saída dos nutrientes aplicados (DOBERMAN, 2007; SNYDER; BRUSELMA, 2007; GARCÍA, 2009).

Os fatores considerados na otimização do uso do N, como dose certa e momento correto de aplicação, além da ação de outros fatores, devem ser avaliados regionalmente, de modo a reduzir perdas e obter melhores práticas para o uso de fertilizantes (FIXEN, 2010). O presente trabalho tem como objetivo avaliar a EUN e a produtividade do milho com combinações de adubação de N em semeadura com doses variáveis de N em cobertura tardia visando ao uso de sensor óptico ativo.

7.4 Material e Métodos

7.4.1 Localização e caracterização edafoclimática da região de estudo

Este estudo foi realizado na Região Oriental, ao sul de Paraguai. Possui um clima classificado segundo Köppen (1931) de Cfa, subtropical úmido. Os experimentos foram compostos por épocas e doses variáveis de N aplicado na cultura do milho, durante o ano agrícola de 2010/2011 no município de Alto Verá, Departamento de Itapúa, Paraguai, em área comercial, de um produtor da cooperativa Colônias Unidas. O solo do experimento é classificado como Latossolo Vermelho, com textura franca argilosa (EMBRAPA, 2006). Na Tabela 1 são apresentadas as características granulométricas e químicas dos solos, determinadas na implantação dos experimentos, conforme procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995).

Tabela 1 - Caracterização da fertilidade do solo antes da instalação do experimento, na camada 0-0,10 m de profundidade, Alto Verá, Itapúa, Paraguai

Local	Argila ¹	MOS ²	pH água ³	P ⁴	K ⁴	Ca ⁵	Mg ⁵	Al ⁵	CTC
	-----g kg ⁻¹ -----			mg dm ⁻³		-----cmol _c L ⁻¹ -----			
Itapúa	441	33	5,7	6,09	0,12	4,54	1,32	0	9,9

¹Determinada por densimetria;; ² Matéria Orgânica do Solo - determinado pelo método Walkley-Black; ³determinado por potenciometria, ⁴determinado pela solução Mehlich⁻¹; ⁵determinados por extração com KCl (1 mol L⁻¹).

O experimento registrou, durante o ciclo da cultura do milho no experimento, alta frequência de precipitação acumulando 852,5 mm. (Figura 1).

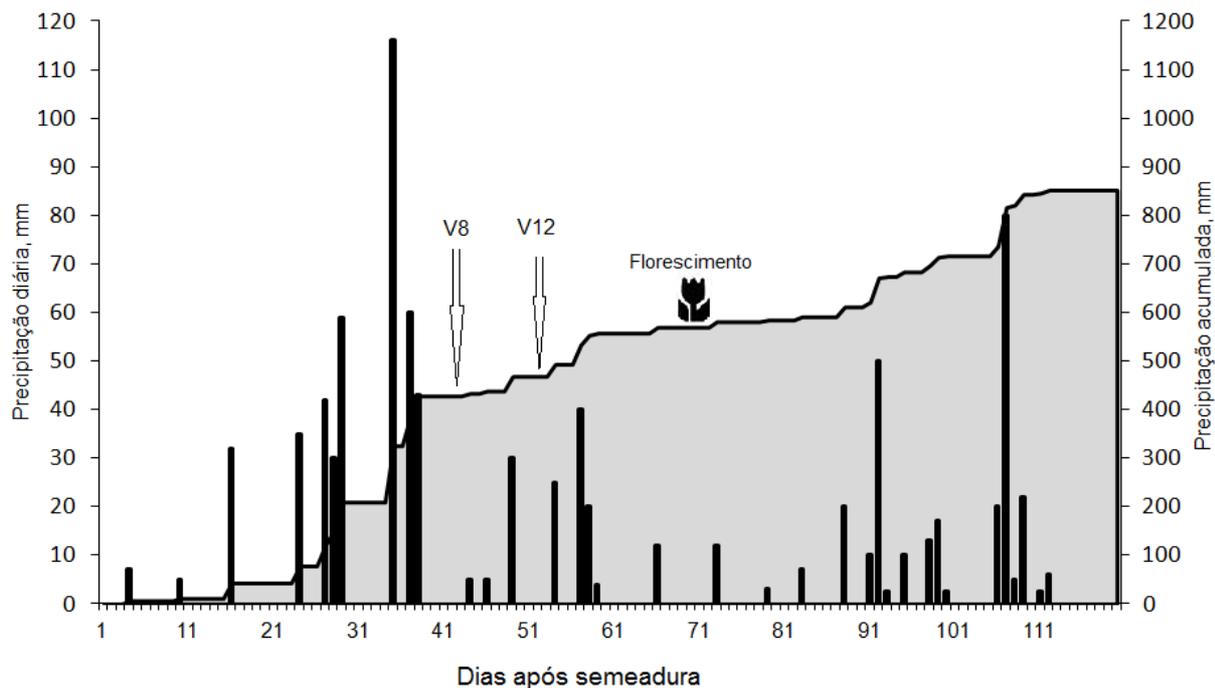


Figura 1 - Representação das precipitações diárias e acumuladas ocorridas nos Experimentos durante o ciclo da cultura do milho na safra 2010/11 Alto Verá, Paraguai

7.4.2 Delineamento experimental e os tratamentos utilizados.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em parcelas sub divididas (Apêndice 1), com três repetições. As dimensões das parcelas principais foram de 10m x 25m e os tratamentos para o experimento foram de diferentes doses de N, aplicadas a lanço na sementeira (0, 30, 60, 90, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia. Sobre os tratamentos das parcelas principais e nas doses 0, 30, 60 e 180 kg ha⁻¹ de N na sementeira foram alocadas às subparcelas de 5 tratamentos de doses de N em cobertura de dimensões 10m x 5m no estágio fonológico V8 e V12. Nestas subparcelas, alocaram-se combinações de adubação com N em sementeira e cobertura, sendo 4 doses de N aplicadas a lanço em cobertura (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia), em estágio V8 aplicadas no momento de emissão da oitava folha do colmo principal. E outra aplicação a lanço de dose única de 60 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia em cobertura em estágio V12 (85% de desenvolvimento vegetativo).

As parcelas e subparcelas com doses de N foram aplicadas visando a simular variadas condições de desenvolvimento das plantas e assim obter diferentes níveis de NDVI, biomassa acumulada na parte aérea, N absorvido e rendimento de grãos para determinar a eficiência do uso de N aplicado em cobertura (V8 e V12).

7.4.3 Características, condução e avaliações feitas nos experimentos

Nos experimentos, as variáveis em estudo foram as doses de N, desta forma, na linha de semeadura foram aplicadas as adubações de K_2O e P_2O_5 , com a mesma dose em todas as parcelas (Tabela 2).

Utilizou-se o sensor ótico ativo Greenseeker (NTech Industries, 2005)), para medir a reflectância do dossel. Este equipamento fornece duas medidas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal resultante no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e está representado pela equação proposta por Rouse et al. (1973):

$$(Eq.1) \quad NDVI = (pnir - pr) / (pnir + pr),$$

Onde: pnir e pr são as reflectâncias no infravermelho próximo e no visível, respectivamente para fins de quantificação do crescimento da vegetação e varia numericamente de -1 a +1.

. As leituras foram realizadas por ocasião do deslocamento linear sobre a unidade experimental com a largura útil captada pelo sensor (0,7 m). Foram feitas leituras NDVI com o aparelho nos estádios V8 e V12 para geração de curvas de respostas para verificar o desenvolvimento nutricional do milho com as doses de N aplicadas em semeadura e antes da aplicação de N em cobertura tardia.

Os dados foram coletados dinamicamente à distância de 0,60m entre o sensor e o alvo e o equipamento foi ajustado para uma leitura por segundo, totalizando cerca de 30 pontos medidos em cada parcela e foi determinado a media para um único valor de NDVI para cada parcela em estudo. A produtividade de grãos de milho foi avaliada colhendo-se manualmente as quatro linhas centrais de cada

parcela, descartando-se a linha das extremidades, perfazendo uma área total de 4m², tendo-se corrigido o peso de grãos para 14% de umidade.

Tabela 2 - Descrição das características do Experimento conduzido em Alto Verá, Paraguai na safra 2010/11

Características	Experimento 2010/2011
Coordenadas	S 26°42'43.20" W 55°44'45.6"
Altitude (m)	310
Histórico SPD (anos)	12
Híbrido semeado	DKB 390 SSP
Culturas anteriores	Soja – trigo - experimento
Data de semeadura	06/11/2010
Leitura NDVI e N cobertura (V8)	42 DAS
Leitura NDVI e N cobertura (V12)	57 DAS
Data de colheita	29/03/2011
Fertilização fosfatada (kg ha ⁻¹)	90
Fertilização potássica (kg ha ⁻¹)	60
Espaçamento (m)	0,70
Stand Final de Plantas	59000

SPD= Sistema plantio direto; SSP: Simple semi-precoce; DAS: Dias após semeadura

Com os dados de produtividade, matéria seca e o N absorvido, obtidos nos experimentos no Paraguai, realizaram-se cálculos dos índices agrônômicos, adaptando a metodologia proposta por Snyder e Bruuselma (2007) e Dobermann (2007), de acordo com a dose de N aplicado à eficiência agrônômica do uso de N (EAN - kg aumento de rendimento do cultivo/kg de nutriente aplicado), eficiência aparente da recuperação de N (ERN - kg do nutriente absorvido/kg do nutriente aplicado), eficiência fisiológica do N (EFN - kg aumento de rendimento do cultivo/kg de nutriente absorvido), produtividade parcial do fator (PPF - kg do rendimento do cultivo/kg de nutriente aplicado) e o balanço parcial do nutriente (BPN - kg nutriente

removido/kg de nutriente aplicado) apresentadas nas equações 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

Eficiência Agronômica do Uso do N (EAN)
 (Eq.2) $EAN = (Y_N - Y_0) / X_N$
 kg aumento de rendimento do cultivo / kg de nutriente aplicado)

Eficiência Aparente de Recuperação do N (ERN)
 (Eq.3) $ERN = (AX_N - AX_0) / X_N$
 kg do nutriente absorvido / kg do nutriente aplicado

Eficiência fisiológica do N (EFN)
 (Eq.4) $EFN = (Y_N - Y_0) / (AX_N - AX_0)$
 kg aumento de rendimento do cultivo / kg de nutriente absorvido.

Produtividade Parcial do Fator (PPF)
 (Eq.5) $PPF = (Y_N / X_N)$
 kg do rendimento do cultivo / kg de nutriente aplicado.

Balanço Parcial do N (BPN)
 (Eq.6) $BPN = C_N / X_N$
 kg nutriente removido / kg de nutriente aplicado.

Onde =

Y_N = rendimento de grãos na dose de N

Y_0 = rendimento de grãos sem N

X_N = quantidade de N aplicado

AX_N = quantidade de N absorvido pelo milho no florescimento

AX_0 = quantidade de N absorvido, na testemunha sem aplicação de N

C_N = quantidade de N extraído pela colheita de grãos

Para análise da variância, teste F, foram procedidas regressões, os cálculos com o pacote estatístico SISVAR 5.3, (FERREIRA, 2010) e as comparações das médias pelo teste Scott Knott a 5% de probabilidade (SCOTT; KNOTT, 1974).

7.5 Resultados e Discussão

7.5.1 Atributos de planta e nutrição do milho nos estádios V8 e V12.

A ocorrência de precipitações frequentes no experimento acumulou um total de 852 mm, sendo que desde a semeadura até o estádio V8 foi registrado 429 mm e até V12, 539 mm. Uma média aproximada de 10 mm por dia no desenvolvimento do milho, indicando a não ocorrência de restrições hídricas que limitassem o desenvolvimento do milho. O principal mecanismo de suprimento de N as plantas é o fluxo de massa, o que demonstra que a água é fundamental para que haja resposta ao nutriente e para que ele seja absorvido pelos vegetais (MALAVOLTA, 2006).

Avaliando os atributos de planta nos estádios V8 e V12 nos tratamentos 0, 30, 60 e 180 kg ha⁻¹ de N na semeadura, realizada anteriormente a aplicação de N em cobertura, verificou-se relações significativas entre a biomassa acumulada na parte aérea, absorção de N e o NDVI obtido com o sensor ótico (Figura 2). No V8 e no V12 os atributos de planta avaliados apresentaram ajuste linear às doses de N aplicado na semeadura.

No estádio V8, a biomassa acumulada na parte aérea obteve um valor mínimo de 2.006 kg ha⁻¹ e máximo de 3.590 kg ha⁻¹ com um R² = 0,81 (p = 0,0019). O milho absorveu N entre 58 e 103 kg ha⁻¹ gerando um R² = 0,83 (p = 0,0026) e os valores de NDVI obtidos pelo sensor foram de 0,698 e 0,794 com o ajuste mais baixo de R² = 0,76 (p = 0,046). Porém, para o estádio V12, as relações aumentaram, sendo que para a biomassa acumulada, verificou-se um alto R² = 0,98 (p = 0,0001) e a produção de matéria seca entre 7.300 e 9.418 kg ha⁻¹. O N absorvido variou entre 121 e 228 kg ha⁻¹, ajustando-se relações de R² = 0,91 (p = 0,0015). Assim também para o NDVI no V12 houve alta relação com elevado R² = 0,91 (p = 0,0001) com valores mínimos de 0,808 e 0,878.

Blackmer et al. (1996) demonstraram anteriormente que propriedades espectrais, refletância e transmitância das folhas do milho são afetadas pela deficiência de nitrogênio. Martin et al. (2007) reportaram correlações significativas

entre NDVI e biomassa com doses de N nos estádios de V8 até V12 em milho e baixa relação nos primeiros estádios V3 até V5.

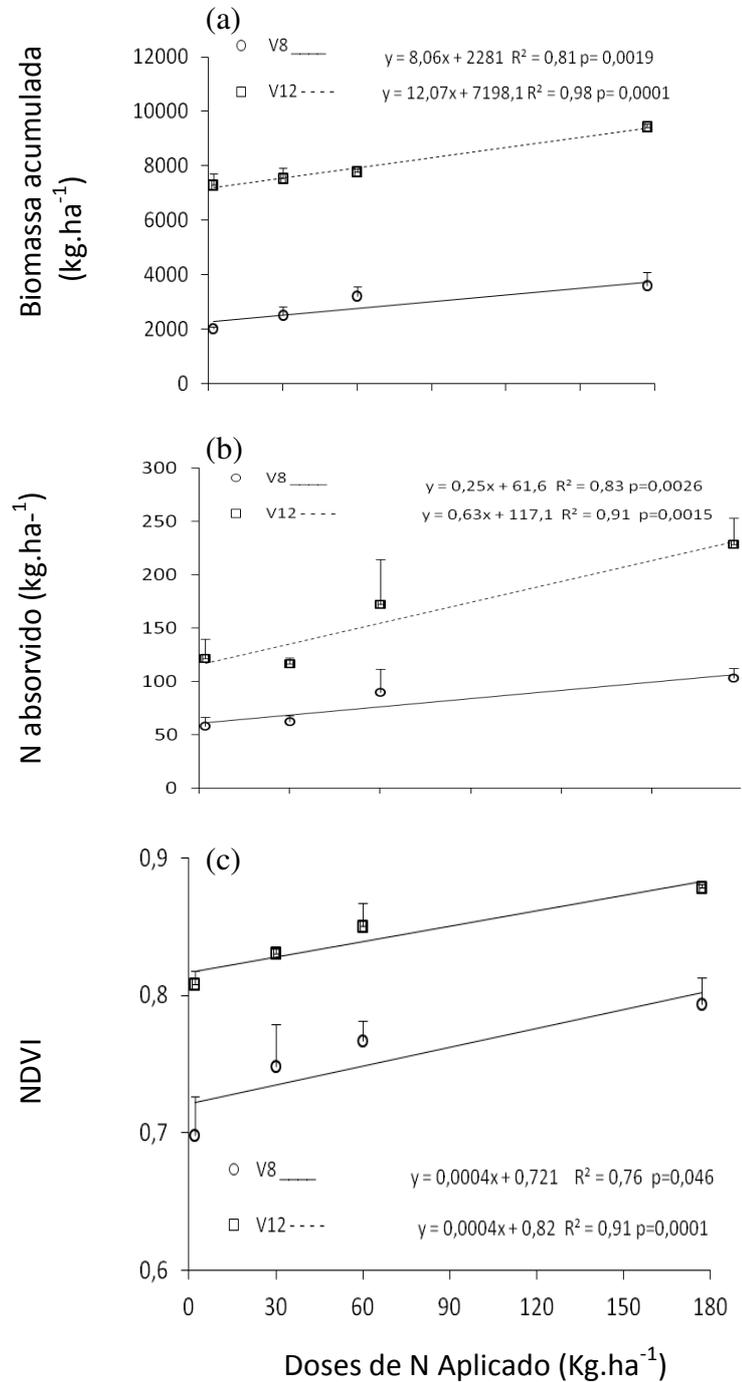


Figura 2 – Biomassa acumulada na parte aérea (a), N absorvido (b) e NDVI (c) no estágio V8 e V12 do milho em função das doses de N aplicado. Paraguai, safra 2010/11.

As altas relações entre NDVI em estádios entre V8 e V12 com o N absorvido e a produção de biomassa, indicam que o NDVI é uma ferramenta eficiente para gerar recomendações de N a taxa variável em cobertura (FREEMAN et al., 2007). Raun (2005) justificou que quando o desenvolvimento vegetativo começa a fechar e as entrelinhas ficam cobertas por folhas, os valores de NDVI aumentam pela diminuição do solo exposto e pelo aumento da quantidade de massa verde. Outro fator importante, é que com o acúmulo de biomassa principalmente no estágio V14 e no início do florescimento, a capacidade de detectar diferenças entre plantas diminui e proporcionalmente, reduz a capacidade do sensor em captar a variabilidade entre plantas.

7.5.2 Cálculo dos índices agronômicos em função das doses de nitrogênio em cobertura no milho

Na Tabela 3, apresentam-se as interações significativas entre as variáveis analisadas, os resultados de produtividade e os dados obtidos dos índices agronômicos com as doses de N em semeadura (0, 30, 60 e 180 kg ha⁻¹) sob os níveis de N em cobertura (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ em V8 e 60 kg ha⁻¹ em V12).

Avaliando cada dose de N em semeadura com as doses de N em cobertura, na dose 0 kg ha⁻¹ de N, a maior produtividade (1.1369 kg ha⁻¹) foi verificado com a dose em cobertura de 60 (V8) kg ha⁻¹ seguido de 60 V12 (1.0321 kg ha⁻¹) com incrementos de 34 e 21 % em relação á dose 0 de N em semeadura e cobertura que gero a produtividade mais baixa do experimento 8.476 kg ha⁻¹ de grãos de milho.

Para a dose 30 kg ha⁻¹ em semeadura, a maior produtividade de 12.406 kg ha⁻¹ foi gerada com a dose 90 kg ha⁻¹ apresentando semelhança com a produtividade 12365 kg ha⁻¹ do tratamento 60 (V12) kg ha⁻¹ os quais apresentaram incrementos de 27 e 25 % com relação á dose 0 de N em cobertura. Nesta dose de semeadura foi encontrada uma maior resposta de 13 % em produtividade na adubação de cobertura tardia de 60 kg ha⁻¹ em V12 na comparação com V8.

Para a dose 60 kg ha⁻¹ em semeadura, verificou-se diferença significativa dos tratamentos em cobertura apenas com a dose 0 kg ha⁻¹ de N (10.001 kg ha⁻¹), apresentando produtividades semelhantes nas épocas (V8 e V12) e nas doses de

adubação de cobertura com incrementos entre 15 e 20% em relação à dose 0 de N. Por último, na dose de 180 kg ha⁻¹ de N em semeadura, todas as doses em cobertura não apresentaram diferenças significativas com um maior rendimento para a dose 0 kg ha⁻¹ de N em cobertura de 13157 kg ha⁻¹. Para os tratamentos sem aplicação de N em cobertura, observou-se um rendimento superior na dose 180 kg ha⁻¹ de N, que foi de 13157 kg ha⁻¹, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos (Tabela 3)

Portanto, existiu um efeito substitutivo entre as doses de N em semeadura e as doses de N em cobertura. A medida que aumentaram as doses na semeadura diminuíram a resposta das doses em cobertura. Já na dose 180 kg ha⁻¹ de N não existiu resposta às doses de N em cobertura e houve até decréscimo na produtividade provavelmente pelo suprimento acima da necessidade total do milho na semeadura. Assim também verificou-se na dose 0 kg ha⁻¹ de N em semeadura que houve os maiores incrementos percentuais (27, 34, 16 e 21 %) na produtividade com as doses 30, 60 (V8), 90 e 60 (V12) Kg ha⁻¹ de N em cobertura em comparação ao tratamento sem N em semeadura e na cobertura (Tabela 3).

Costa (2000), com três doses de N na semeadura e cobertura (30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N), demonstrou que a aplicação de 30 kg ha⁻¹ na semeadura e 90 kg ha⁻¹ em cobertura proporcionou a maior produtividade, sendo essa a melhor estratégia de parcelamento da adubação nitrogenada. De acordo com Bull (1993), estudos realizados no Brasil mostram que os melhores resultados são obtidos com a aplicação de 30 kg de N ha⁻¹ na semeadura e de 60 a 120 kg de N ha⁻¹ entre 30 e 45 dias após a germinação. Os resultados de produtividade de grãos obtidos no experimento também indicam respostas semelhantes aos autores citados apresentando maiores incrementos em produtividade na dose 90 kg ha⁻¹ (30+60; 60+30) e nas combinações com a dose 120 (30+90; 60+60).

Analisando os índices agronômicos, os valores de EAN variaram entre 11 e 97 kg kg⁻¹ e os valores de PPF entre 360 e 42 kg kg⁻¹, demonstrando significância nos tratamentos com uma resposta inversamente proporcional ao aumento das quantidades do N aplicado. A maioria dos tratamentos combinados apresentaram valores com alta EUN. Snyder e Bruselma (2007) reportaram que para os Estados Unidos (EUA), a EAN geralmente varia entre 20 e 30 kg kg⁻¹ e os valores de PPF entre 40 e 80 kg kg⁻¹. Assim, valores acima dessas referências de EAN e PPF indicam sistemas bem manejados que têm capacidade de suprir N ao milho.

García (2009) sustentou que os agricultores sul-americanos em geral aplicam N abaixo das necessidades do milho, isto gera valores superiores de EAN e PPF em torno de 30% mais alto ao comparar com os encontrados nos EUA. No experimento, apenas a dose 180 kg ha⁻¹ na semeadura, com seus tratamentos em cobertura, apresentaram menores valores de EAN e PPF devido às doses elevadas de N, que indicaram uma baixa EUN nessa condição nutricional para o milho, de acordo à referência de Snyder e Bruselma (2007).

O valor do índice EFN na dose 0 kg ha⁻¹ em semeadura combinada com a dose de cobertura de 60 kg ha⁻¹ (V12) foi o maior valor encontrado no experimento (75 kg kg⁻¹) e a única que diferiu significativamente com as doses 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N aplicado em V8. Uma ampla combinação de fertilização em semeadura e em cobertura apresentaram EFN semelhante e não mostraram diferenças significativas nas comparações das médias. Trabalhos têm verificado que os híbridos de milho contemporâneos apresentam maiores picos de absorção de N durante o espigamento e o enchimento de grãos (RAJCAN; TOLLENAAR, 1999; SILVA et al., 2005b), absorvendo mais de 50% do N requerido durante todo o ciclo apenas nessa fase, o que evidencia mudanças na curva de absorção e de assimilação de N no milho, em relação aos genótipos lançados em décadas passadas.

Na recuperação do N aplicado nos tratamentos e medidos pelo índice ERN, apenas diferiu no tratamento 0 kg ha⁻¹ de N em semeadura, verificando-se o menor valor na combinação com 60 kg ha⁻¹ (V12) com um valor de 0,59 kg kg⁻¹ e o maior valor encontrado de 1,80 kg kg⁻¹ na dose 30 kg ha⁻¹ de cobertura que foi semelhante aos tratamentos 30 e 60 kg ha⁻¹ (V8). Verificou-se, entre as doses de semeadura com cada dose de cobertura, diferenças significativas nas doses 0, 30 e 60 kg ha⁻¹ (V8). Valores entre 0,5 e 0,8 kg kg⁻¹ propostos por Dobermann (2007), como pontos de alta eficiência de recuperação de N, sendo verificadas nas adubações de semeadura e cobertura que adicionaram entre 90 e 150 kg ha⁻¹ de N ao sistema. O índice BPN demonstrou interações e, também, diferenças significativas em todas as comparações realizadas. Os mais altos balanços foram encontrados nas doses combinadas de 30(0+30; 30+0) e 60 (60+0; 30+30; 0+60) kg ha⁻¹ de N originado pela baixa adição de N e alta exportação pelos grãos de milho.

Os valores baixos de ERN e BPN que indicam uma baixa EUN, verificou-se com a maior dose de N aplicado e com adições combinadas acima de 210 (180 +30; 180+60; 180+ 90) kg ha⁻¹ de N no sistema apresentaram valores entre 0,55 e 0,76

kg kg⁻¹, que indicam maior entrada que saída do N. Dados semelhantes de respostas nestas elevadas doses foram verificados por Snyder e Bruselma (2007) nos EUA e também foram encontrados por Rillo e Richmond (2006) na Argentina com tratamentos que superaram 220 kg ha⁻¹ de N aplicados na semeadura.

Tabela 3 - Índices agronômicos gerados da resposta do milho em função das doses de N em cobertura sob níveis de N em sementeira. Paraguai, Safra 2010/11.

N	Produtividade de Grãos (kg ha ⁻¹)					EAN ¹ (kg kg ⁻¹)					PPF ² (kg kg ⁻¹)				
	0	30	60	90	60V12	0	30	60	90	60V12	0	30	60	90	60V12
Sementeira	...Doses de N Cobertura em kg ha ⁻¹ ...														
0	8476 Bc	10813 Ab	11369 Aa	9903 Ab	10321 Ab	-	97 Aa	48 Ba	24 Ca	31 Ca	-	360 Aa	189 Ba	110 Ca	172 Ba
30	9798 Bb	10618 Bb	10975 Ba	12406 Aa	12265 Aa	44 Aa	36 Ab	28 Ab	33 Aa	42 Aa	327 Aa	177 Bb	122 Cb	103 Da	136 Cb
60	10001 Bb	12242 Aa	11933 Aa	11590 Aa	11951 Aa	25 Ab	42 Ab	29 Ab	21 Aa	29 Aa	167 Ab	136 Bc	99 Cc	77 Db	99 Cc
180	13157 Aa	12272 Aa	12529 Aa	11389 Aa	12673 Aa	26 Ab	18 Ac	17 Ab	11 Aa	17 Aa	73 Ac	58 Bd	52 Bd	42 Bc	53 Bd
	EFN ³ (kg kg ⁻¹)					ERN ⁴ (kg kg ⁻¹)					BPN ⁵ (kg kg ⁻¹)				
0	-	42 Ba	32 Ba	16 Ba	75 Aa	-	1,80 Aa	1,58 Aa	1,06 Aa	0,59 Ba	-	4,69 Aa	2,46 Ba	1,43 Ca	2,20 Ba
30	26 Aa	20 Aa	25 Aa	51 Aa	53 Aa	1,22 Aa	1,01 Ab	1,15 Aa	0,65 Aa	0,59 Aa	4,25 Aa	2,30 Bb	1,59 Cb	1,34 Ba	1,80 Cb
60	24 Aa	60 Aa	27 Aa	28 Aa	46 Aa	1,05 Aa	0,73 Ab	1,14 Aa	0,75 Aa	0,68 Aa	2,17 Ab	1,77 Bc	1,29 Cc	1,00 Db	1,30 Cc
180	52 Aa	27 Aa	42 Aa	46 Aa	40 Aa	0,55 Ab	0,68 Ab	0,41 Ab	0,27 Aa	0,45 Aa	0,95 Ac	0,76 Bd	0,68 Bd	0,55 Bc	0,68 Bd

EAN¹= Eficiência agronômica do uso do N; PPF²= Produtividade parcial do fator; EFN³= Eficiência fisiológica do N; ERN⁴= Eficiência aparente de recuperação do N; BPN⁵ = Balanço parcial do N. Letras iguais, minúsculas, não diferem entre si nas columnas e letras iguais, maiúsculas, não diferem entre si nas linhas pelo Scott-Knott a 5% de significância.

7.5.3 Avaliação combinada dos índices agrônômicos baseados na adubação de cobertura tardia de N no milho

A interpretação dos resultados experimentais demonstram que o potencial produtivo do milho está relacionado à aplicação de doses de N que variam de 90 kg ha⁻¹ a 180 kg ha⁻¹ de N, e que nas doses entre 60 e 120 kg ha⁻¹ de N, encontra-se a máxima eficiência econômica da adubação de N no milho (SILVA et al., 2005a; GROSS et al., 2006; VELOSO et al., 2006; GOMES et al., 2007).

Na tentativa de avaliar melhor o experimento e estimar a eficiência da adubação combinada entre semeadura e cobertura (V8 e V12), foram analisadas as combinações possíveis obtidas no experimento da adubação total de 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N aplicado. Na figura 3, observam-se a produtividade de grãos e o N absorvido em função das doses de N aplicadas em semeadura e em cobertura (V8 e V12). As maiores produtividades de grãos verificaram-se com tratamentos combinados, com parte de N em semeadura e parte de N em cobertura. Obteve-se a maior produtividade com a dose 30+90 (12.406 kg ha⁻¹) seguidos com semelhanças nas combinações 30+60 (V12), 60+30, 60+60 (V8) e 60+60 (V12) kg ha⁻¹ de N. Existiu um decréscimo significativo no rendimento de grãos nas combinações sem N (60+0; 0+60 (V8); 0+60 (V12); 90+0; 0+90; 120+0).

Meira et al. (2009), com cinco combinações de N aplicado em semeadura e V8 (0+120; 30+90; 60+60; 90+30 e 120+0 kg de N ha⁻¹), também verificaram a máxima produtividade de grãos no milho com a combinação 30+90 kg de N ha⁻¹. O parcelamento e a época de aplicação do adubo nitrogenado constituem-se em alternativas para o incremento da produtividade, aplicação de metade do N na semeadura e metade no estágio de 4 a 6 folhas, metade do N na semeadura e metade no estágio 8 a 10 folhas geraram as melhores produtividades em um experimento de combinação de épocas de adubação de N (SILVA et al., 2005a).

Comparando as médias das épocas em cobertura V8 e V12, verificou-se uma resposta maior na adubação tardia 30+60 (V12) 12265 kg ha⁻¹, do que na adubação 30+60 (V8) 10976 kg ha⁻¹ na dose total de 90 kg ha⁻¹ de N. Para as doses combinadas 60 e 120 kg ha⁻¹ não existiram diferenças significativas em produtividade de grãos nas épocas V8 e V12. Nas condições em que a dose de N aplicadas foram inferiores às exportações de N nos grãos (60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de

N), foi verificada que a fertilização mais próxima da maior demanda de N do milho (V8 e V12) se mostrou como uma estratégia eficiente. Verificando as doses maiores de N 90 e 120 kg ha⁻¹ houve um aumento de produtividade quando foi combinado as doses de semeadura e cobertura nos tratamentos. Assim também a falta de N na base gerou caída na produtividade e não foi compensado por adubações tardias (0+90) kg ha⁻¹, além de que a dose sem N em cobertura (120+0) gerou decréscimo significativo na produtividade em comparação com as combinações (30+90; 60+60 V8; 60+60 V12) kg ha⁻¹ de N (Figura 3).

As alterações fisiológicas ocorridas nos híbridos modernos de milho sugerem mudanças na dinâmica de absorção do N, aumentando a habilidade da planta de absorvê-lo durante o enchimento de grãos. Isto pode justificar o atraso da adubação em cobertura, sempre que restrições climáticas não impedirem o suprimento adequado de N em estádios anteriores (SILVA, et al., 2005b).

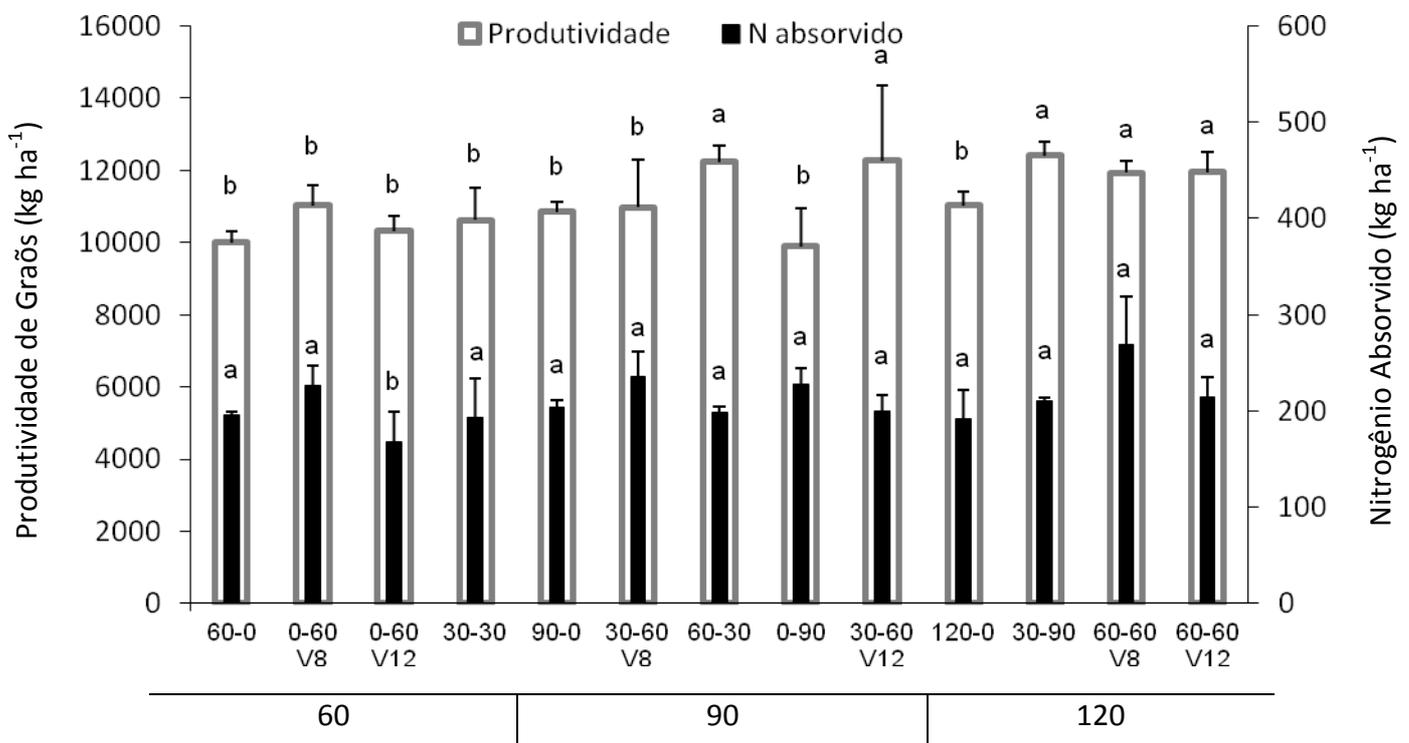


Figura 3 – Rendimento de grãos e nitrogênio absorvido em função das combinações de doses em N em semeadura e cobertura sob 3 níveis de N aplicado (60, 90 e 120 kg ha⁻¹). Paraguai, 2011.

Para o N absorvido pelo milho, a combinação 0+60 em V12 foi a única que diferiu estatisticamente das restantes combinações e também do valor mais baixo de 169 kg ha⁻¹ de N absorvido demonstrando que a deficiência inicial não é compensada posteriormente. Porém, os valores mais altos foram verificados nas combinações 60+60 (V8), 30+60 (V8) e 60+60 (V12) apresentando 269, 236 e 214 kg ha⁻¹ de N absorvido, respectivamente.

A alta precipitação verificada no experimento nos estádios vegetativos contribuiu numa estável e semelhante absorção de N nas combinações até o florescimento, sendo que provavelmente no enchimento de grãos obtiveram-se as absorções de N que diferenciaram os rendimentos da produtividade do milho nas combinações realizadas (Figura 3). Um híbrido moderno que possa desenvolver seu potencial vegetativo, sem restrições hídricas, e que seja capaz de manter o aparato fotossintético da planta fisiologicamente ativa por mais tempo e com um ótimo crescimento radicular, consegue maior absorção de N no período de enchimento de grãos e maior produtividade por área ao final do ciclo da cultura (RAJCAN; TOLLENAAR, 1999; SANGOI et al., 2001).

Na Figura 4, são apresentados os índices agronômicos (PPF e EAN) ligados com a produção de grãos em função das combinações de doses e épocas. Os resultados demonstram que na maioria dos tratamentos os aumentos de PPF refletiam em aumento de EAN.

Os valores de PPF e EAN com 60 kg ha⁻¹ de N aplicado não diferiu significativamente entre suas combinações e foi encontrado maiores valores no tratamento 0+60 kg ha⁻¹ de N com valor PPF de 184 kg kg⁻¹ e EAN 43 kg kg⁻¹, seguido pela dose 30+30 kg ha⁻¹ de N que obteve PPF de 177 kg kg⁻¹ e EAN 36 kg kg⁻¹. As combinações com o N total aplicado de 90 kg ha⁻¹ apresentou o maior valor de PPF (136 kg kg⁻¹) e EAN (63 kg kg⁻¹) no tratamento 30+60 (V12) kg ha⁻¹ de N que diferiu significativamente somente do tratamento 0+90, valores mais baixos de PPF 110 kg ha⁻¹ e assim também de EAN 24 kg kg⁻¹ indicando que o déficit inicial não foi compensado posteriormente.

As combinações de N total aplicado de 120 kg ha⁻¹, sem N aplicado em cobertura, resultaram em valores PPF (92 kg kg⁻¹) e EAN (24 kg kg⁻¹) mais baixos, assim também as doses 60-60 (V8) e 60-60 (V12) kg ha⁻¹ de N foram semelhantes em PPF (99 kg kg⁻¹ e 100 kg kg⁻¹) e iguais em EAN (29 kg kg⁻¹).

A maioria das combinações sem N em semeadura ou cobertura tiveram uma diminuição na resposta de PPF e EAN quando foram comparadas com as combinações parceladas do N aplicado em semeadura e cobertura. Assim também nas doses 90 e 120 kg ha⁻¹ foram eficientes varias combinações com resultados semelhantes de EAN e PPF.

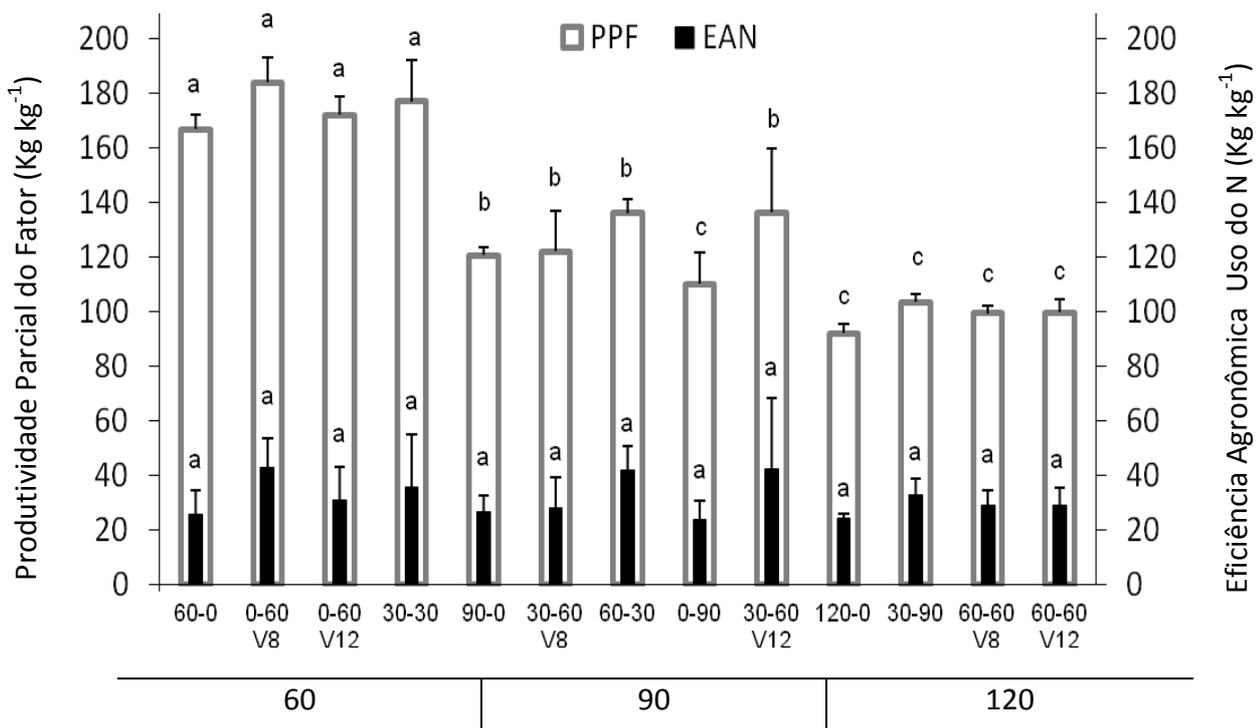


Figura 4 – Produtividade parcial do fator (PPF) e a eficiência agrônômica do uso do nitrogênio (EAN) em função das combinações de doses em N em semeadura e cobertura sob 3 níveis de N aplicado (60, 90 e 120 kg ha⁻¹). Paraguai, safra 2010/11.

Segundo Dobermann (2007) e Snyder e Bruselma (2007), as condições ideais de produção com máxima eficiência do uso do N posicionam-se nos valores entre 40 e 80 kg kg⁻¹ de PPF. Nesta situação não se encontraram resultados com as combinações analisadas. Entretanto, os resultados obtidos concordam com o relatado por Garcia (2009), que os valores baixos de N aplicados na América do Sul, entre 40 e 120 kg ha⁻¹ de N geram valores em torno de 30% mais altos aos valores ideais propostos pelos pesquisadores. Rillo e Richmond (2006) na Argentina, com doses de aplicação entre 50 e 220 kg de N na semeadura, verificaram valores altos

de PPF e EAN semelhantes aos encontrados neste trabalho no Paraguai, safra 2010/11.

Dobermann (2007), reportou que para EAN são encontrados valores de 10-30 kg kg^{-1} na maioria dos experimentos, sendo que valores acima de 30 kg kg^{-1} indicam sistemas bem manejados e equilibrados. Assim, neste trabalho conduzido no Paraguai, nas doses 60, 90 e 120 kg ha^{-1} de N total aplicado, verificou-se uma alta EAN, já que os valores de EAN na maioria dos tratamentos combinados situo-se na faixa de 30 e 40 kg kg^{-1} de N.

Na Figura 5, estão expressos índices que envolvem recuperação de N no sistema, valores de BPN equilibrados foram verificados nas combinações com a dose de 120 kg ha^{-1} de N total aplicado, em que a relação de entrada e saída de N foram próximos a 1. Os valores de BPN foram maiores na dose 60 kg ha^{-1} para todos os tratamentos, em que se verificou uma alta remoção de N do sistema em comparação ao N suprido com o fertilizante. De forma geral, o BPN acima do valor 1 kg kg^{-1} para todos os tratamentos, significando maior saída que ingresso de N no sistema, e os valores BPN foram decrescentes no aumento das doses combinadas 60, 90 e 120 kg ha^{-1} de N apresentaram valores de BPN de 2,3; 1,7; 1,4 kg kg^{-1} respectivamente, nas medias das combinações de semeadura e cobertura.

Para os valores de ERN nas doses 60, 90 e 120 kg ha^{-1} de N as recuperações mais baixas foram 0,59 kg kg^{-1} (0+60 V12); 0,73 kg kg^{-1} (60+30) e 0,50 kg kg^{-1} (120+0) sendo absorvido menores quantidades do N fornecido pelo fertilizante. Os maiores valores encontrados nas mesmas doses resultaram 1,58 kg kg^{-1} (0+60 V8); 1,15 kg kg^{-1} (30+60 V8) e 1,14 kg kg^{-1} (60+60 V8) os quais demonstraram elevada capacidade de recuperar e absorver N do fertilizante e das reservas do solo.

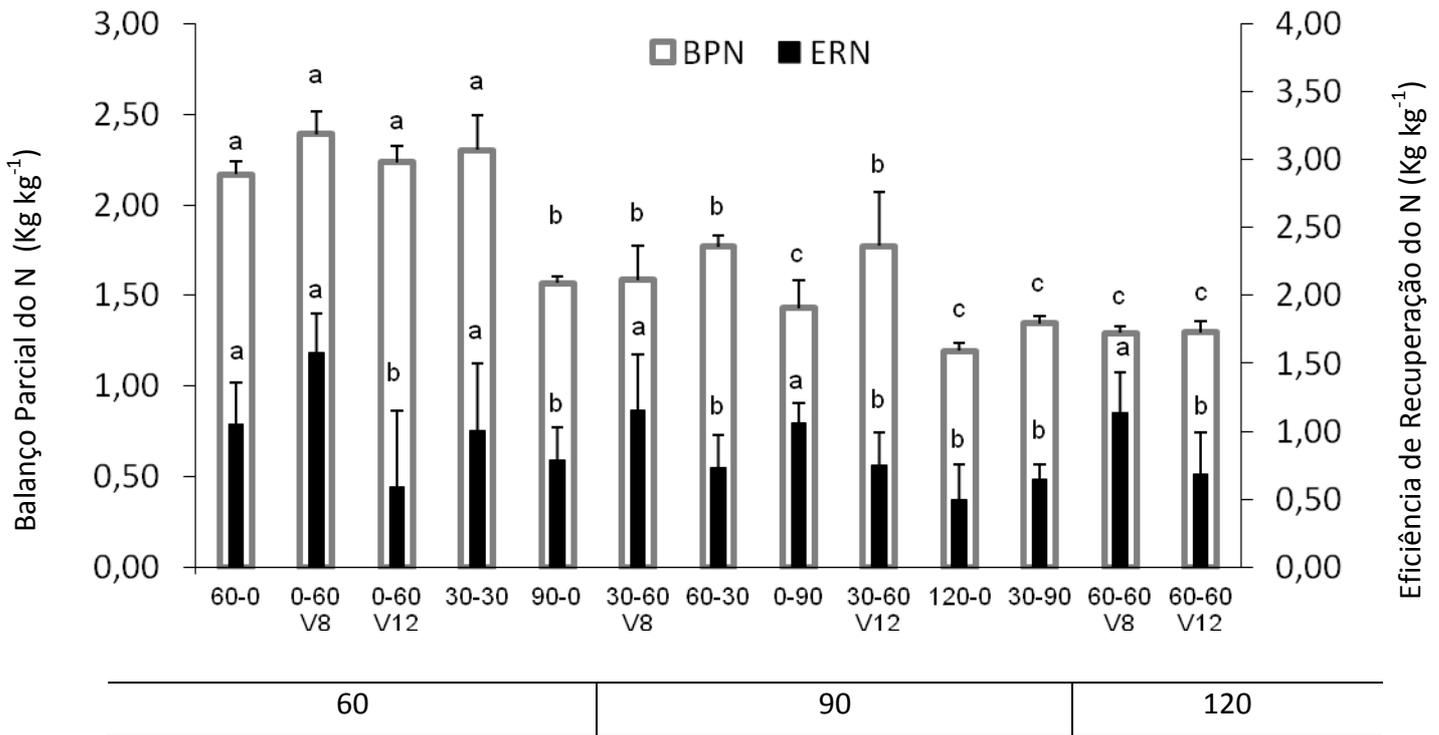


Figura 5 - Balanço parcial do nitrogênio (N) e eficiência de recuperação do nitrogênio em função das combinações de doses em N em semeadura e cobertura sob 3 níveis de N aplicado (60, 90 e 120 kg ha⁻¹). Paraguai, 2011.

Lara Cabezas (2000) sustentou que a obtenção de ERN acima de 1 é possível, uma vez que as plantas adubadas podem explorar maior volume de solo e, conseqüentemente, acumular maior quantidade de N e biomassa. Kuzyakov et al., (2000) explicaram que a ERN não distingue a origem do N, se esse vem do solo ou do fertilizante, o que poderia justificar as recuperações acima de 100%. Assim, temos o denominado *priming effect* positivo, em que o fornecimento de N pode acelerar a mineralização da matéria orgânica do solo e disponibilizar mais N à planta adubada.

Comparando a ERN nas épocas de adubação em cobertura, as adubações em V8 obtiveram uma melhor recuperação de N que no estágio V12, mas finalmente o comportamento diferenciado de ERN entre tratamentos não refletiu em redução na produtividade de grãos. A justificativa a esta situação apresentada está na provável absorção de N no enchimento de grãos pelo bom desenvolvimento vegetativo do milho (RAJCAN; TOLLENAAR, 1999; SANGOI et al., 2001).

Na Tabela 4, são apresentadas as diversas combinações de doses de N na semeadura e cobertura que alcançaram a faixa referencia de EUN ótima para os índices em estudo PPF, EAN, BPN e ERN. Foi verificado que para PPF e EAN a maioria das combinações realizadas com 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N verificaram ótima EUN. Para o índice BPN existiram altos valores nas doses 60 e 90 kg ha⁻¹ devido á alta exportação dos grãos pela produtividade elevada, e somente nas combinações de 120 kg ha⁻¹ resultaram em valores próximos ao equilíbrio entre saída e entrada de N no sistema. O índice ERN nas combinações em semeadura e cobertura de N aplicado nas doses maiores 90 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ foram as melhores estratégias de recuperação do N aplicado. A substituição do N em semeadura com adubação tardia 90 (0+90) kg ha⁻¹ e a fertilização com N somente na semeadura 90 (90+0) kg ha⁻¹ e 120 (120+0) kg ha⁻¹ foram menos eficientes. As doses combinadas 90 (60+30; 30+60 V12) kg ha⁻¹ e 120 (30+90; 60+60 V12) kg ha⁻¹ apresentaram as melhores EUN baseados em produtividade e absorção do N segundo os índices avaliados e os valores de referencia (DOBERMANN, 2007; SNYDER BRUSELMA; 2007).

Tabela 4 - Tratamentos com valores de EUN ótima nas doses de N aplicado. Paraguai, 2011.

*Faixa ótima de EUN	Tratamentos com EUN ótima		
	60	90	120
	----- Doses combinadas de N aplicado em kg ha ⁻¹ -----		
PPF ¹ > 60 kg kg ⁻¹	60+0; 0+60 V8; 0+60 V12; 0+30	90+0; 30+60 V8; 30+60 V12; 60+30; 0+90.	120+0; 30+90; 60+60 V8; 60+60 V12.
EAN ² >25 kg kg ⁻¹	60+0; 0+60 V8; 0+60 V12; 30+30.	90+0; 30+60 V8; 30+60 V12; 60+30 .	30+90; 60+60 V8; 60+60 V12
BPN ³ 0,7 - 1,3 kg kg ⁻¹			120+0; 30+90; 60+60 V8; 60+60 V12.
ERN ⁴ 0,5 - 0,8 kg kg ⁻¹	0+60 V12	60+30 30+60 V12	30+90 60+60 V12

* Valores de referência adotados (DOBERMANN, 2007; SNYDER; BRUSELMA; 2007).

PPF¹= Produtividade Parcial do Fator; EAN²= Eficiência Agronômica do Uso do N; BPN³ = Balanço Parcial do N; ERN⁴= Eficiência Aparente de Recuperação do N

7.6 Conclusões

As avaliações de NDVI realizadas no estágio V12 apresentaram maiores relações em diagnosticar o estado nutricional do milho do que em V8.

Obteve-se nos índices calculados PPF, EAN, BPN, ERN valores de ótima EUN nas combinações das doses de N em semeadura e cobertura. No entanto, a ausência de fertilização na semeadura ou na cobertura apresentaram menores EUN.

O atraso da adubação nitrogenada em cobertura (V12) não provocou decréscimo na produtividade de grãos quando foi combinado com N na semeadura e apresentou uma maior EUN que as combinações de adubação realizadas em cobertura (V8).

A possibilidade de retrazar a adubação em cobertura aumenta a janela de adubação com N no milho, sendo uma alternativa para planejar o momento da adubação de N com a previsão climática existente em cada região.

7.7 Referências

AMADO, T.J.C; MIELNICZUK, J; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.241-248, 2002.

BLACKMER, T. M; SCHEPERS, J. S; VARVEL, G. E; WALTER-SHEA, E. A. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, v.88, p.1- 5, 1996.

BINDER, D. L. D. H; SANDER, D. T; WALTERS. 2000. Maize response to time of N application as affected by level of N deficiency. **Agronomy Journal** 92: 1228–1236.

BÜLL, L. T. **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, POTAFOS, 1993. p.148-196.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜL, L.T.; CANTARELLA, H. (Eds). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba : POTAFOS, 1993. p.147-198.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; DIEKOW, J.; AITA, C.; PAVINATTO, P.S.; VIEIRA, F.C.B.; VENDRUSCLO, E.R.O. Nitrogen fertilizer split-application for corn in no-tillage succession to black oats. **Scientia Agricola**, v.59, p.549-554. 2002.

COSTA, A. M. **Adubação nitrogenada na cultura do milho (Zea mays L.) em sistema de plantio direto**. 2000. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu

DOBERMANN A. **Nutrient Use Efficiency – Measurement and management**. IFA Internacional Workshop on fertilizar best management practices. 7-9 Marzo, Bruselas, Bélgica. 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FERNANDES, F.C.S. & LIBARDI, P.L. Percentagem de recuperação de nitrogênio pelo milho, para diferentes doses e parcelamentos do fertilizante nitrogenado. **Revista Brasileira Milho Sorgo**, 6:285-296, 2007.

FERREIRA, D. F. **Programa Sisvar.exe**: sistema de análise de variância. Lavras: UFLA, 2010.

FIXEN P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. IN: Prochnow, L. I; CASARIN, V; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 1-22.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576p.

FREEMAN, K. W; GIRMA, K; ARNALL, D. B; MULLEN, R. W; MARTIN, K. L; TEAL, R.K; RAUN, W. R; 2007. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. **Agronomy Journal**. 99, 530-536.

GARCÍA F. **Eficiencia de uso de nutrientes y mejores prácticas de manejo para la nutrición de cultivos**. p. 9-19. In: Simposio Fertilidad 2009. Acasuso. International Plant Nutrition Institute. p.250. 2009

GOMES, R. F; SILVA, A. G. da; ASSIS, R. L; PIRES, F. R. Efeito de doses e época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agrônômicos da cultura do milho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 931-938, 2007.

GROSS, M. R; VON PINHO, R. G; BRITO, A. H. Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamento entre fileiras na cultura do milho em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 3, p. 387-393, 2006.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica. 1931.

KUZYAKOV, Y; FRIEDEL, J. K; Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology & Biochemistry** 32, 1485 - 1498.

LARA CABEZAS, W. A. R; TRIVELIN, P. C. O; KONDÖRFER, G. H; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 14:363-376, 2001.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631p.

MAR, G. D. do; MARCHETTI, M. E.; SOUZA, L. C. F. de. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 2, p. 267-274, 2003.

MARTIN, K; GIRMA, K. W; FREEMAN, R. K; TEAL, B; TUBAN´ A, D. B; ARNALL, B; CHUNG, O; WALSH, W.R. RAUN. Expression of Variability in Corn as Influenced by Growth Stage Using Optical Sensor Measurements **Agronomy Journal**. 99:384–389 (2007).

MELCHIORI, R. J. M. Sensores remotos para el manejo del nitrógeno. In: **Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas**, 9., 2010, Manfredi. Anais. Córdoba: INTA, 2010. p 215-220.

MEIRA, F. A; BUZETTI, S; ANDREOTTI, M; ARF, O; SÁ, M. E; ANDRADE, J. A. C. **Fontes e épocas de aplicação do nitrogênio na cultura do milho irrigado.** Seminário: Ciências Agrárias, Londrina, v. 30, n. 2, p. 275-284, 2009.

NTech Industries. Model 505 GreenSeeker **TMhand held optical sensor unit operating manual (Rev. G).** NTech Industries, Inc. 740 South State Street, Ukiah, CA 95482, USA. (2005).

RAJCAN, I; TOLLENAAR, M. Source: Sink ratio leaf senescence in maize. I. Dry matter and partitioning during grain filling. **Field Crops Research.**, 60:245-253, 1999.

RAUN, W.R; SOLIE, J.B; STONE, M.L; MARTIN, K.L; FREEMAN, K.W; MULLEN, R.W; ZHANG,H; SCHEPERS, J.S; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 36, 2759-2781. 2005.

RAUN, W.R; J.B. SOLIE, G.V. JOHNSON, M.L. STONE, R.W. MULLEN, K.W. FREEMAN, W.E. THOMASON, E.V. LUKINA. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal.** 94:815-820. 2002.

RILLO S; RICHMOND P. **Evaluación de tres criterios de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en siembra directa en un suelo hapludol.** Maíz en Siembra directa.. Anales AAPRESID 74-78. Rosario, Argentina. 2006

ROUSE, J.W; R.H. HAAS, J.A. SCHELL; D.W. DEERING. 1973. **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.** Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 301-317.

SÁ, J.C.M. **Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto.** Passo Fundo: Aldeia Norte, 1996. 23p.

SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.1, p.159-168, 2001.

SCHARF, P.C; WIEBOLD; LOHRY, J. A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. **Agronomy Journal.** 94:435-441. 2002

SCOTT, A. J; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v.30, n.3, p.507-12, 1974.

SILVA, E.C; BUZETTI, S; GUIMARÃES, G.L; LAZARINI, E; SÁ M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.353-362, 2005a.

SILVA, P.R.F; STRIEDER, M.L; SILVA, R.P.C; RAMBO, L; SANGOI, L; ARGENTA, G; FORSTHOFER, E.L; SILVA, A.A. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. **Scientia Agricola.**, 62:487-492, 2005(b).

SNYDER C.S. Y T.W. BRUULSEMA. **Nutrient use efficiency and effectiveness in North America:** Indices of Agronomic and Environmental Benefit. IPNI. Junio 2007.

SOUZA, A.C.; CARVALHO, J.G.; PINHO, R.G.V.; CARVALHO, M.L.M. Parcelamento e época de aplicação de nitrogênio e seus efeitos em características agronômicas do milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v.25, n.2, p.321-329, 2001.

TEDESCO, M. J; GIANELLO, C; BISSANI, C.A; BOHNEN, H; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

VELOSO, M. E. C; DUARTE, S. N; DOURADO NETO, D; MIRANDA, J. H; SILVA, E. C; SOUSA, V. F. Doses de nitrogênio na cultura do milho, em solos de várzea, sob sistema de drenagem subterrânea. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 5, n. 3, p. 382-394, 2006.

8 CONCLUSÕES GERAIS

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade e também o que mais influencia na produtividade da cultura do milho. Atualmente, muito se discute a respeito de quantidades e das épocas de N aplicadas à cultura do milho, como também a sua influência na produtividade e sua eficiência na recuperação do N aplicado ligado às condições climáticas apresentadas nas diferentes regiões produtoras.

Neste trabalho realizado no Paraguai, as condições meteorológicas apresentadas foram favoráveis para verificar a importância do N e da disponibilidade hídrica no desenvolvimento e produtividade do milho. No experimento 2010 houve uma condição de boa frequência de precipitações nos estádios avaliados e no experimento 2011 existiu déficit hídrico em estádios de maior demanda, ocasionando decréscimo na produtividade.

No experimento 2010, verificou-se produtividades elevadas e crescentes entre a dose 0 kg ha^{-1} de N e a dose 180 kg ha^{-1} de N na semeadura e também condições de alta EUN. Já para o experimento 2011, houve resposta somente até a dose 60 kg ha^{-1} de N e baixos valores de EUN nas doses maiores (90 , 120 e 180 kg ha^{-1} de N) que gerou condições contraditórias, em que nessa situação, a validação da hipótese de antecipar integralmente adubação de N na semeadura ocasionou grandes perdas ambientais e baixa rentabilidade para um produtor de milho. Portanto, existem fortes interações com o clima e a tomada de decisões nas recomendações é comprometida pelo grande risco que gera para o produtor adubar com N integralmente na semeadura. Também se constatou uma amplitude na janela para as adubações em cobertura do milho, que poderiam diminuir os riscos mencionados. Verificou-se que a cobertura tardia (V12) não provocou decréscimo na produtividade de grãos quando foi combinada com N na semeadura e apresentou uma maior EUN que as combinações de adubações realizadas no estádio fenológico V8.

O parcelamento da época de aplicação do adubo nitrogenado constitui-se em alternativas para aumentar a eficiência da adubação com N pela cultura do milho e para mitigar suas possíveis perdas. No experimento 2010, verificou-se melhor resposta do parcelamento em relação às aplicações integrais na semeadura.

Atualmente, existe tecnologia para que os vegetais possam ser monitorados com técnicas de reflectância de espectroscopia óptica, atuando como forma de identificar a curva de acúmulo de biomassa e N absorvido das culturas ao longo do seu ciclo, pesquisados para aprimorar as recomendações existentes de N em cobertura em épocas mais tardias.

Neste trabalho, o sensor óptico “Greenseeker” foi eficiente em estimar o estado nutricional do milho e os valores de NDVI e em função das doses de N apresentaram relações positivas significativas com suas variáveis dependentes de biomassa acumulada na parte aérea, N absorvido e produtividade de grãos do milho. O sensor óptico nas condições climáticas diferenciadas do experimento 2010 e 2011 possibilitou a detecção do estado nutricional do milho apresentando maiores respostas em V8, V10 e V12, validando assim a hipótese de que a adubação de N em cobertura pode ser aprimorada com a utilização das técnicas de espectroscopia óptica.

Maiores pesquisas devem ser realizadas com espectroscopia óptica para obter informações necessárias para gerar algoritmos de recomendação de N em cobertura para o milho baseados em previsões da disponibilidade hídrica e em valores diferenciados de EUN.

ANEXOS

Anexo A – Croqui de Bloco Experimental utilizados nos experimentos.

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
T6 T1° Parcela 180 N Sub Parcela 0 N	T6 T5° Parcela 180 N Sub Parcela 60 N V12	T6 T2° Parcela 180 N Sub Parcela 30 N V8	T6 T4° Parcela 180 N Sub Parcela 60 N V8	T6 T4° Parcela 180 N Sub Parcela 90 N V8
T3 T1° Parcela 60 N Sub Parcela 0 N	T3 T2° Parcela 60 N Sub Parcela 30 N V8	T3 T5° Parcela 60 N Sub Parcela 60 N V12	T3 T4° Parcela 60 N Sub Parcela 90 N V8	T3 T3° Parcela 60 N Sub Parcela 60 N V8
T1 T1° Parcela 0 N Sub Parcela 0 N	T1 T3° Parcela 0 N Sub Parcela 60 N V8	T1 T4° Parcela 0 N Sub Parcela 90 N V8	T1 T2° Parcela 0 N Sub Parcela 30 N V8	T1 T5° Parcela 0 N Sub Parcela 60 N V12
T2 T1° Parcela 30 N Sub Parcela 0 N	T2 T4° Parcela 30 N Sub Parcela 90 N V8	T2 T3° Parcela 30 N Sub Parcela 60 N V8	T2 T5° Parcela 30 N Sub Parcela 60 N V12	T2 T2° Parcela 30 N Sub Parcela 30 N V8
T5 Parcela 120 N				
T4 Parcela 90 N				

Observações: Bloco ao acaso com parcelas sub divididas utilizado no Artigo 3 (Coluna 1 até 5). Bloco ao acaso utilizado no Artigo 1 e Artigo 2 (Coluna 1).

Anexo B – Imagens do Experimento

Observações: Florescimento do milho no experimento 2010 (a) e no experimento 2011 (c); determinação de N absorvido no laboratório (b) e medições NDVI em V6 no experimento 2010 (d).