

SERGIO GAIAD

**ALTERAÇÕES NA RIZOSFERA E SEUS REFLEXOS NA BIOMASSA,
NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NA FOTOSSÍNTESE DE ERVA-MATE
DECORRENTES DO USO DE DIFERENTES FONTES
DE NITROGÊNIO**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Florestal, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal - Área de Silvicultura, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Bruno Reissmann

CURITIBA

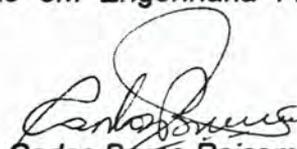
2003



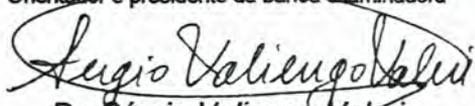
Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias – Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Av. Lothário Meissner, 3400 – Jardim Botânico – CAMPUS III
80210-170 - CURITIBA - Paraná
Tel. (41) 360.4212 - Fax. (41) 360.4211 - <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao>
e-mail: pinheiro@floresta.ufpr.br

PARECER
Defesa nº 516

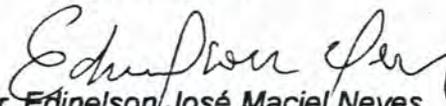
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o doutorando *SERGIO GAIAD* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "ALTERAÇÕES NA RIZOSFERA E SEUS REFLEXOS NA BIOMASSA, NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NA FOTOSSÍNTESE DE ERVA-MATE DECORRENTES DO USO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do acadêmico, habilitando-o ao título de *Doutor* no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em *Silvicultura*.


Dr. Carlos Bruno Reissmann

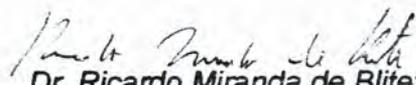
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola
Orientador e presidente da banca examinadora


Dr. Sérgio Valiengo Valeri

Universidade Estadual Paulista – UNESP- Jaboticabal
Primeiro examinador


Dr. Edinelson José Maciel Neves.

EMBRAPA/CNP-Florestas
Segundo examinador

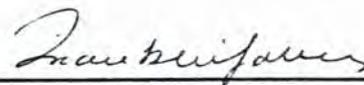

Dr. Ricardo Miranda de Blitez

Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental - SPVS
Terceiro examinador


Dr. Renato Marques

Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR
Quarto examinador

Curitiba, 05 de agosto de 2003.


Franklin Galvão

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal



A Débora, Pedro Henrique e João Felipe, que me apoiaram, incentivaram e me amaram durante todo o percurso.

Aos Meus Pais, pelos ensinamentos de vida e pelo esforço em fornecer as ferramentas que me permitiram chegar até aqui.

Com meu amor,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente,

- ao Prof. Dr. Carlos Bruno Reissmann, Prof. Titular do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela orientação, acompanhamento e revisão do estudo, e amizade;
- à EMBRAPA, pela possibilidade da realização deste curso, e em especial à Chefia da EMBRAPA Florestas, pelo incentivo e suporte fornecido durante todo o transcorrer do curso;
- à Consultora da EMBRAPA Florestas, Dr^a. Miroslava Rakocevic, pelo suporte técnico na área de fotossíntese, revisão do manuscrito e amizade;
- ao Dr. Edílson Batista de Oliveira, Pesquisador da EMBRAPA Florestas, pela orientação e auxílio na definição dos delineamentos experimentais e análises estatísticas;
- ao Dr. Jorge Ribaski, Pesquisador da EMBRAPA Florestas, pelo auxílio e sugestões na área de fotossíntese ;
- aos estagiários Guilherme Erthal Risi e Ulysses Rocha Netto, pelo auxílio na coleta de dados;
- à Ervateira Bitumirim, pelo fornecimento das mudas de erva-mate usadas no primeiro experimento;
- aos funcionários dos Laboratórios de Solos e de Microbiologia, e do Setor de Campos Experimentais, da EMBRAPA Florestas, pelo auxílio durante todas as fases dos experimentos;
- aos funcionários da Secretaria da Pós-Graduação do Curso de Engenharia Florestal, especialmente ao Reinaldo, pela paciência e presteza com que sempre me atenderam;
- em especial à Débora, minha esposa, pela revisão do manuscrito, conferência das referências, e constante demonstração de carinho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Gerais	3
1.1.2 Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ESPÉCIE	4
2.2 ERVA-MATE: NECESSIDADES NUTRICIONAIS	5
2.3 FONTES DE N E ALTERAÇÕES NA RIZOSFERA	11
2.4 FONTES DE N E PRODUÇÃO DE BIOMASSA	16
2.5 FONTES DE N E FOTOSSÍNTESE LÍQUIDA	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	22
3.2 LOCALIZAÇÃO	22
3.3 EXPERIMENTO 1	22
3.3.1 Instalação e Condução do Experimento	22
3.3.1.1 Produção e seleção de mudas	22
3.3.1.2 Preparo e transplante de mudas	23
3.3.1.3 Delineamento experimental	23
3.3.1.4 Tratamentos	25

3.3.1.5 Período de condução do experimento	26
3.3.2 Coleta do Experimento e Preparo das Amostras	26
3.3.2.1 Amostras de solo	26
3.3.2.2 Amostras vegetais	27
3.3.3 Análises Químicas e Físicas	27
3.3.4 Análise Estatística	28
3.4 EXPERIMENTO 2	28
3.4.1 Instalação e Condução do Experimento	28
3.4.1.1 Produção, preparo e transplante das mudas	28
3.4.1.2 Delineamento experimental	29
3.4.1.3 Tratamentos	29
3.4.1.4 Período de condução do experimento	30
3.4.2 Coleta do Experimento e Preparo das Amostras	30
3.4.2.1 Tempo de condução do experimento	30
3.4.2.2 Coleta de amostras de solo e planta	31
3.4.3 Análises Químicas e Estatísticas	31
3.5 EXPERIMENTO 3	31
3.5.1 Instalação e Condução do Experimento	31
3.5.1.1 Produção, preparo e transplante das mudas	31
3.5.1.2 Delineamento experimental	32
3.5.1.3 Tratamentos	32
3.5.1.4 Período de condução do experimento	32
3.5.2 Condução do Experimento e Preparo das Amostras	33
3.5.2.1 Coleta de amostras de solo e planta	33
3.5.2.2 Avaliação das características morfológicas e da fotossíntese	33
3.5.2.2.1 Características morfológicas	34

3.5.2.2.2 Avaliação da taxa de fotossíntese líquida	34
3.5.3 Análises Químicas e Estatística	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 EXPERIMENTO 1	36
4.1.1 Parâmetros de Biomassa	36
4.1.2. Composição Química da Biomassa	38
4.1.3 Alterações nas Características Químicas do Solo	47
4.2 EXPERIMENTO 2	52
4.2.1 Parâmetros de Biomassa	52
4.2.2 Composição Química da Biomassa	56
4.2.3 Alterações nas Características Químicas do Solo	66
4.3. EXPERIMENTO 3	76
4.3.1 Parâmetros de Biomassa	76
4.3.2 Composição Química da Biomassa	79
4.3.2 Alterações nas Características Químicas do Solo	86
4.3.4 Fontes de N e Fotossíntese Líquida	93
5. CONCLUSÕES	103
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
REFERÊNCIAS	106
ANEXOS	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	TEOR DE MACRONUTRIENTES (g.kg^{-1}) RELATADOS EM LITERATURA NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE PLANTAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DE DIFERENTES CAUSAS DE VARIAÇÃO.	7
TABELA 2 -	TEOR DE MICRONUTRIENTES (mg.kg^{-1}) EM PLANTAS DE ERVA-MATE, RELATADOS EM LITERATURA, EM FUNÇÃO DE DIFERENTES CAUSAS DE VARIAÇÃO.	8
TABELA 3 -	NÍVEIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS DO SOLO NA REGIÃO ERVATEIRA ARGENTINA, EM RELAÇÃO À PRODUTIVIDADE DA ERVA MATE.	8
TABELA 4 -	TEOR DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE ERVA MATE NA REGIÃO ERVATEIRA DA ARGENTINA, EM RELAÇÃO À PRODUTIVIDADE.	9
TABELA 5 -	TEOR DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE ERVA MATE NO PARANÁ, SANTA CATARINA E RIO GRANDE DO SUL, EM RELAÇÃO À PRODUTIVIDADE.	9
TABELA 6 -	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO USADO NO EXPERIMENTO 1..	24
TABELA 7 -	PRODUTOS QUÍMICOS USADOS E AS RESPECTIVAS QUANTIDADES DE NUTRIENTES CONTIDAS NOS MESMOS, NECESSÁRIOS PARA UM QUILOGRAMA DE SOLO SECO.	25
TABELA 8 -	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO USADO NO EXPERIMENTO 2..	29
TABELA 9 -	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO USADO NO EXPERIMENTO 3..	32
TABELA 10 -	BIOMASSA (g) E RELAÇÃO RAIZ / BIOMASSA AÉREA (R/A) DE MUDAS DE ERVA MATE, NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DA PLANTA, NO EXPERIMENTO 1. VALOR MÉDIO DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.	37
TABELA 11 -	TEORES DE MACRO (g.kg^{-1}) E MICRONUTRIENTES (mg.kg^{-1}), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS, EM MUDAS DE ERVA MATE NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.	45
TABELA 12 -	CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta^{-1}), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS, EM MUDAS DE ERVA MATE, NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.	46

TABELA 13 -	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO DE MUDAS DE ERVA MATE NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.	50
TABELA 14 -	BIOMASSA (g) E TAXA RAIZ / PARTE AÉREA (R/A), DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA MATE, NO EXPERIMENTO 2. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, AOS 10 E 25 DIAS APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.	54
TABELA 15 -	COMPARAÇÃO DO TEOR DE NUTRIENTES, ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES.	60
TABELA 16 -	COMPARAÇÃO DO TEOR DE NUTRIENTES, ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES.	61
TABELA 17 -	TEOR DE NUTRIENTES, EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (10 OU 25 DIAS) NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA MATE, NO EXPERIMENTO 2. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES.	62
TABELA 18 -	COMPARAÇÃO DO CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta ⁻¹), ENTRE TRATAMENTOS, NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS EM MUDAS DE ERVA MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	63
TABELA 19 -	COMPARAÇÃO DO CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta ⁻¹), ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	64
TABELA 20-	CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta ⁻¹), EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (10 OU 25 DIAS), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	65
TABELA 21 -	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS FRAÇÕES NÃO RIZOSFÉRICA E RIZOSFÉRICA DO SOLO, EM MUDAS DE ERVA-MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	71

TABELA 22 -	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS FRAÇÕES NÃO RIZOSFÉRICA E RIZOSFÉRICA DO SOLO, EM MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	72
TABELA 23 -	EFEITO DE DIFERENTES FONTES DE N SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES. .	73
TABELA 24 -	EFEITO DE DIFERENTES FONTES DE N SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO TRATAMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES. ...	74
TABELA 25 -	GANHO DE BIOMASSA (g) NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10 ^o E 25 ^o DIA APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	77
TABELA 26 -	TEOR DE MACRO (g.kg ⁻¹) E MICRONUTRIENTES (mg.kg ⁻¹), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTO EM MUDAS DE ERVA-MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	83
TABELA 27 -	TEOR DE MACRO (g.kg ⁻¹) E MICRONUTRIENTES (mg.kg ⁻¹), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTO EM MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	84
TABELA 28 -	ACÚMULO DE NUTRIENTES (mg.parcela ⁻¹), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DAS MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10 ^o E 25 ^o DIA APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	85
TABELA 29 -	EFEITO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	90
TABELA 30 -	EFEITO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	91

TABELA 31 -	EFEITO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO RIZOSFÉRICO, EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.	99
TABELA 32 -	ACÚMULO DE NUTRIENTES (mg.parcela ⁻¹) NA BIOMASSA AÉREA DE MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10 ^o E 25 ^o DIA APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.....	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DOS RECIPIENTES UTILIZADOS NOS DOIS PRIMEIROS EXPERIMENTOS	24
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA NAS MUDAS DE ERVA MATE, AOS 60 DIAS, EM FUNÇÃO DAS DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO, NO EXPERIMENTO 1.	38
FIGURA 3 - DIFERENÇA ENTRE AS FRAÇÕES DE SOLO, NÃO RIZOSFÉRICO (T) E RIZOSFÉRICO (R), NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SOLOS, EM MUDAS DE ERVA MATE, COM 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 1.	51
FIGURA 4 - ALOCAÇÃO DA BIOMASSA, EM MUDAS DE ERVA MATE, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLETA E DA FONTE DE NITROGÊNIO APLICADA, NO EXPERIMENTO 2.	55
FIGURA 5 - RESPOSTA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO À DIFERENTES FONTES DE N, NAS FRAÇÕES DE SOLO NÃO RIZOSFÉRICO (NR) E RIZOSFÉRICO (R), NAS DUAS AVALIAÇÕES REALIZADAS (10 E 25 DIAS), NO EXPERIMENTO 2.	75
FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA MATE, EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (A = 10 DIAS E B = 25 DIAS), NO EXPERIMENTO 3.	78
FIGURA 7 - ALTERAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO EM RESPOSTA À UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE N, NAS FRAÇÕES DE SOLO NÃO RIZOSFÉRICO (NR) E RIZOSFÉRICO (R), NAS DUAS AVALIAÇÕES REALIZADAS (10 E 25 DIAS), NO EXPERIMENTO 3:	92
FIGURA 8 - PPFD AO NÍVEL DAS PLANTAS DE ERVA MATE, REGISTRADO EM CASA DE VEGETAÇÃO DURANTE 9 DIAS, NA ÉPOCA DE EXPERIMENTO 3.	94
FIGURA 9 - RAZÃO VERMELHO: VERMELHO DISTANTE (V:VD) AO NÍVEL DAS PLANTAS DE ERVA MATE, REGISTRADA EM CASA DE VEGETAÇÃO DURANTE 9 DIAS, NA ÉPOCA DE EXPERIMENTO 3.	94
FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE FOLHAS EM MUDAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA FONTE DE NITROGÊNIO, NO EXPERIMENTO 3. ...	96

FIGURA 11 - EVOLUÇÃO DA ÁREA FOLIAR ($\text{cm}^2.\text{planta}^{-1}$) EM MUDAS DE ERVA-MATE, DURANTE A CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO 3, EM FUNÇÃO DAS FONTES DE NITROGÊNIO UTILIZADAS.	96
FIGURA 12 - BIOMASSA AÉREA (g.planta^{-1}) DE MUDAS DE ERVA MATE NAS DIFERENTES COLETAS (A) E INCREMENTO DE BIOMASSA (g.planta^{-1}) ENTRE O 10 ^o E 25 ^o DIA (B), NOS COMPARTIMENTOS AÉREO E RADICULAR, E NA BIOMASSA TOTAL, EM FUNÇÃO DA FONTE DE NITROGÊNIO, NO EXPERIMENTO 3.	98
FIGURA 13 - VARIAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA (cg/lunas) E DO CONTEÚDO DE N TOTAL (linha) NAS FOLHAS DE MUDAS DE ERVA MATE, ENTRE O 10 ^o E O 25 ^o DIA APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.	101
FIGURA 14 - FOTOSSÍNTESE LÍQUIDA, EM FOLHAS VELHAS E EM FOLHAS NOVAS DE MUDAS DE ERVA MATE, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE AVALIAÇÃO.	102

ALTERAÇÕES NA RIZOSFERA E SEUS REFLEXOS NA BIOMASSA, NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NA FOTOSÍNTESE DE ERVA-MATE DECORRENTES DO USO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos avaliar a influência de diferentes fontes nitrogenadas sobre a erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.) em termos de: a) reflexos nas características químicas das frações rizosférica e não rizosférica do solo; b) produção de biomassa; c) composição química foliar e, d) alterações nas taxas de fotossíntese líquida em mudas crescendo em casa de vegetação. Assim, foram instalados três experimentos, seqüencialmente. Todos os tratamentos receberam 120 mgN.kg^{-1} TFSA; $60 \text{ mg P}_2\text{O}_5.\text{kg}^{-1}$ TFSA; e $40 \text{ mg K}_2\text{O.kg}^{-1}$ TFSA. O solo utilizado nos dois primeiros experimentos foi um CAMBISSOLO HÁPLICO, Tb, Distrófico típico, A proeminente e textura argilosa (CH) e no terceiro as mudas cresceram em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A proeminente e textura média (LV). No primeiro as fontes N-NH₄ e N-NO₃ foram comparadas entre si e com uma Testemunha (T), sem N. Todos os tratamentos receberam uma solução contendo todos os macronutrientes diferindo somente a fonte de N para cada um deles. As mudas cresceram por 60 dias. Na avaliação foram separadas as duas frações do solo, enquanto a biomassa da planta foi separada em raiz, caule, folhas velhas e folhas novas. A adição das fontes de N aumentou a produção de biomassa das plantas em relação a T, especialmente nas folhas novas. Não foram detectadas diferenças significativas entre os valores de pH (CaCl₂), embora o solo rizosférico da fonte N-NH₄ tenha apresentado concentrações de H⁺ e H⁺ superiores à T. No segundo experimento, foi adicionado o tratamento uréia e o tempo de condução do experimento foi reduzido para 25 dias, com uma avaliação intermediária no 10º dia. No lugar da solução de macronutrientes utilizada no primeiro experimento, usou-se exclusivamente (NH₄)₂SO₄ e Ca(NO₃)₂ como fonte amoniacal e nítrica, respectivamente. A produção de biomassa não foi afetada pelas diferentes fontes de N. Ocorreu uma elevação dos teores de Ca nas folhas de plantas da fonte N-NO₃ e uma redução nos teores de Fe nas folhas velhas das plantas que receberam quaisquer das fontes de N. A fonte uréia acarretou uma elevação inicial do pH rizosférico no 10º dia e um posterior decréscimo no 25º dia atingindo os patamares dos valores observados em T. Os teores de Mg²⁺, Na⁺ e Soma de Bases (S) diferenciaram-se nas duas frações do solo nos tratamentos nitrogenados. No terceiro experimento alterou-se somente o tipo de solo, com menor poder tampão e incluiu-se a avaliação da fotossíntese líquida. As fontes N-NH₄ e uréia tiveram maior ganho em biomassa em relação a T e a N-NO₃. O acúmulo de N foi significativo nos tratamentos nitrogenados, comparativamente a T, enquanto o acúmulo de Ca foi significativo em N-NO₃, em relação aos demais tratamentos. Por outro lado a fonte N-NH₄ apresentou maior acúmulo de P e Mg, na biomassa aérea, em relação a T e à N-NO₃, além de maior acúmulo de K em relação a T. A fonte N-NH₄ provocou uma acidificação da rizosfera, enquanto uréia apresentou o mesmo comportamento do segundo experimento em relação ao pH. Houve ainda, um aumento na acidez ativa e nos teores Al³⁺ na rizosfera da fonte N-NH₄. A fonte N-NH₄ apresentou as maiores taxas de fotossíntese líquida, superiores à T e a N-NO₃, associado a um aumento no

número de folhas. Conclui-se que: 1) o tipo de solo influencia as respostas das diferentes fontes de N, em termos de produção de biomassa; 2) o aumento na concentração de N nas folhas, por si, não foi suficiente para promover um ganho em produção de biomassa das mudas de erva-mate; 3) houve uma tendência de acidificação do pH rizosférico em mudas nutridas com a fonte N-NH₄ em ambos os solos, embora isto tenha ocorrido de forma mais clara no LV; 4) erva-mate apresenta uma característica de acúmulo de Na⁺ na rizosfera, sendo que possíveis interações com K⁺ devem ser investigadas; e 5) o aumento na área foliar e na taxa de fotossíntese líquida, na fonte N-NH₄, coincidem com um aumento na absorção de K, Mg, Fe, e Mn, no LV.

Palavras-Chave: *Ilex paraguariensis*, amônio, nitrato, uréia, pH do solo

CHANGES IN RHIZOSPHERE AND ITS EFFECTS ON BIOMASS, CHEMICAL COMPOSITION AND NET PHOTOSYNTHESIS IN ERVA-MATE DUE TO THE USE OF DIFFERENT NITROGEN SOURCES .

ABSTRACT

This study aimed to verify the influence of different N sources on erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil) seedlings grown in greenhouse in terms of: a) changes in the chemical characteristic of bulk and rhizosphere soil; b) biomass production; c) chemical composition of the shoots; and d) changes in net photosynthesis. Three experiments were set up in sequence. Seedlings in all treatments, in all three experiments, received a base fertilization of 60 mg $P_2O_5.kg^{-1}$ soil plus 40 mg $K_2O.kg^{-1}$ soil. The nitrogen treatments received 120 mg $N.kg^{-1}$ soil. The soil used in the first two experiments was an Inceptisol and an Oxisol was used in the last experiment. In the first experiment $N-NH_4$ and $N-NO_3$ sources were compared between them and with a control (C) with no applied N. All seedlings received also a nutrient solution containing all the macronutrients but N for the control treatment. Seedlings grew for 60 days in glasshouse. Bulk and rhizosphere soil were separated manually shaking the root system. The biomass was separated in roots (R), stem (S), new (NL), and old leaves (OL). Seedlings grown under N treatments had a higher biomass weight compared to C, mainly the NL. There was no difference in pH ($CaCl_2$) between bulk and rhizosphere soil although the $N-NH_4$ source showed higher concentration of H+Al and H^+ in relation to C. In the second experiment an urea treatment was added and the time span of the observations was reduced from 60 to 25 days, including an intermediate evaluation on the 10th day. The nutrient solution used in the first experiment, was substituted by $(NH_4)_2SO_4$ and $Ca(NO_3)_2$ and urea as N sources. Different forms of N did not affect the biomass production. There was an increase in Ca in leaves from $N-NO_3$ treatment and a decrease in Fe levels in the leaves from N treatments. There was an initial increase in pH ($CaCl_2$) in the urea treatment at the 10th day and a drop in the 25th day reaching values similar to C. There was a difference between bulk and rhizosphere soil on the concentration of Mg^{2+} , Na^+ , and Sum of Bases (S). In the third experiment the soil type was changed for a sandier one maintaining the N treatments of the second experiment and including an evaluation of net photosynthesis (Pn). The biomass production was higher in $N-NH_4$ and Urea treatments compared to C and $N-NO_3$. N content was higher in N treatments while Ca content was higher in $N-NO_3$ plants than in the other treatments. The $N-NH_4$ source showed a higher content of P and Mg in the shoots than C and $N-NO_3$ and a higher content of K as compared with C. There was a decrease in rhizosphere pH at the $N-NH_4$ treatment and Urea behaved in the same manner as in the second experiment. There was also an increase in H+Al and Al^{3+} content in the rhizosphere in plants that receives the $N-NH_4$ source. Plants nourished with $N-NH_4$ had higher rates of Pn and presented an increase in the number of leaves. It was concluded that: 1) soil type affected the response of erva-mate to different N sources, in terms of biomass production; 2) increasing N content in leaves alone was not able to promote gain in biomass production of erva-mate seedlings; 3) seedlings receiving $N-NH_4$ showed a tendency to acidify the rhizosphere soil in both soils, although it was more evident on Oxisol ; 4) erva-mate seedlings accumulates Na^+ in the rhizosphere soil and its interaction with K^+ should be investigated; and 5) the increase in leaf area

and net photosynthesis observed at the N-NH₄ treatment was coincident with an increasing absorption of K, Mg, Fe, and Mn in the Oxisol.

Key words: *Ilex paraguariensis*, ammonium, nitrate, urea, soil pH

1. INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) compõe um dos sistemas agroflorestais mais antigos da região sul do Brasil, sendo englobado em cerca de 180.000 propriedades rurais, nos Estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul, congregando cerca de 600 empresas e mais de 700.000 trabalhadores diretos. Estes números ganham ainda mais importância quando se considera que grande parte dessa atividade ocorre em nível de pequenas e médias propriedades.

Dentre as principais preocupações na exploração dos ervais estão sua produtividade e sustentabilidade. Como as partes extraídas das erveiras são suas folhas e ramos finos, existe uma grande exportação de nutrientes do ecossistema. O elemento exportado em maior quantidade é o nitrogênio, podendo chegar, em termos equivalentes, a cerca de 500 kg de uréia.ha⁻¹.ano⁻¹.

As respostas à adição de fertilizantes ou práticas que visem um incremento na produtividade ou no equilíbrio nutricional das plantas, visando a sustentabilidade do erval, tem sido inconsistentes. Alguns estudos mostram, por exemplo, aumentos lineares na produção de massa verde com a elevação das concentrações de nitrogênio, enquanto em outras situações estas respostas não ocorrem ou não são consistentes. O mesmo é verdadeiro para os demais elementos.

A grande variabilidade genética da erva-mate, associada à diversidade pedológica, na ampla área de ocorrência e cultivo da espécie, e as inúmeras práticas silviculturais utilizadas no manejo da mesma, têm sido consideradas como responsáveis pelos resultados contraditórios nos estudos envolvendo sua nutrição. Assim, o entendimento dos mecanismos envolvidos na absorção dos nutrientes e do seu metabolismo na planta pode contribuir na tomada de decisão sobre a necessidade de adubação e caso seja necessário, sobre a forma mais adequada de executá-la.

Neste contexto, o conhecimento dos processos ocorrendo no espaço ao redor da raiz, chamado de rizosfera, é de vital importância na nutrição das espécies vegetais, independente das condições em que estas estejam se desenvolvendo. As características desta fração diferem em muito do restante do solo, o chamado solo

não rizosférico. O contato direto da raiz com o solo permite uma exploração direta daquela porção e viabiliza a existência de um microsítio diferenciado do restante.

A rizosfera é caracterizada por gradientes que ocorrem ao longo de raízes individuais, em termos de nutrientes, de potencial redox e processos de redução, de exsudatos de raiz, de atividade microbiana e de pH. Estes gradientes são determinados por fatores do solo e da planta, afetando assim, a absorção de nutrientes minerais em geral.

Alterações no pH estão entre os principais fatores afetando a absorção de nutrientes pelas plantas, sendo que a fonte de nitrogênio absorvida pelas mesmas exerce papel decisivo sobre o pH rizosférico. Assim, a forma de nitrogênio absorvido influencia o pH do solo, que por sua vez influencia a proporção de $N-NO_3$ e $N-NH_4$ a ser absorvido pelas plantas.

Diferentes formas de adubação nitrogenada, em culturas de maneira geral, proporcionam respostas diferenciadas das espécies. Genericamente, plantas adaptadas a solos ácidos ou com baixo potencial redox utilizam preferencialmente formas amoniacais (NH_4) enquanto plantas adaptadas a solos calcários, com pH elevado, utilizam preferencialmente formas nítricas (NO_3). Porém, como regra, as taxas de crescimento mais elevadas e maiores produções são obtidas pelo suprimento de um fertilizante contendo as formas amoniacal e nítrica combinadas.

Erva-mate, talvez por ser espécie tolerante a alumínio, suportar elevados níveis de acidez do solo e não responder positivamente à calagem apresenta características próprias e muitas vezes proporciona respostas distintas das relatadas em literatura.

Assim o esclarecimento desses comportamentos através do entendimento dos mecanismos e reações que ocorrem no sistema radicial da espécie, mais especificamente na rizosfera das plantas, pode contribuir para que se possa explorar da melhor maneira possível e de forma mais racional os insumos a serem aplicados na cultura. É neste contexto que se insere este trabalho, visto a inexistência de tais informações para a erva-mate.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Geral

Verificar a influência de diferentes fontes nitrogenadas no pH rizosférico e seus reflexos no desenvolvimento de mudas de erva-mate.

1.1.2. Específicos

Verificar o efeito de diferentes fontes de nitrogênio sobre:

- a produção de biomassa de mudas de erva-mate;
- a composição química foliar de mudas de erva-mate;
- a fotossíntese líquida de mudas de erva-mate.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ESPÉCIE

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), espécie nativa do Sul do Brasil, da Argentina, do Uruguai e do Paraguai (Hoppe *et al.*, 1996) possui distribuição em dois tipos climáticos, segundo a classificação de Köeppen, Cfb (clima temperado) e Cfa (clima subtropical), com chuvas regulares e bem distribuídas ao longo do ano e médias de precipitação em torno de 1500 a 2000 mm. As temperaturas médias anuais variam de 15° a 18°C na região dos pinhais, e de 17° a 21°C em Misiones - Argentina. As geadas são freqüentes ou pouco freqüentes, dependendo da altitude, que varia de 500 a 1500 m acima do nível do mar (Oliveira & Rotta, 1985).

A erva-mate compõe um dos sistemas agroflorestais mais antigos da região sul do Brasil, sendo englobado em cerca de 180.000 propriedades rurais, nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul, congregando cerca de 600 empresas e mais de 700.000 trabalhadores diretos (Congresso..., 1997). Terceiro ciclo da economia paranaense, a indústria do mate exerceu grande influência para o desenvolvimento sócio econômico do sul do Brasil. Até o início da primeira guerra mundial, o mate foi o esteio econômico do Paraná, quando então a madeira começou a conquistar a condição de principal produto. (Unicamp, 2003).

Com o aumento do consumo interno e abertura progressiva ao mercado externo, a erva-mate deixou de ser um produto de consumo restrito a pequenos grupos. Novas formas de consumo são pesquisadas, sendo que os fatores determinantes para a colocação do produto no mercado são: a produtividade, que consiste na relação entre a quantidade obtida e os fatores que influenciam o processo, resultando em eficiência no uso dos recursos; e a qualidade, ou seja, análise de suas características organolépticas (cor, odor, sabor) e composição química, influenciada, entre outros fatores, pelos tratamentos silviculturais realizados para a obtenção da matéria prima e pelos processos de beneficiamento realizados para obtenção do produto final (Câmara ..., 2000).

Apesar da importância social da espécie, durante a maior parte de sua história, a exploração baseou-se no extrativismo, com pouco ou nenhum aspecto tecnológico sendo considerado. Este fato contribuiu para a existência de uma infinidade de práticas silviculturais adotadas pelos produtores, em todas as fases do ciclo da árvore.

O desequilíbrio entre a oferta e a demanda de erva-mate e a melhoria da rentabilidade do empreendimento têm ocasionado um crescente interesse no plantio de erva-mate em escala econômica (Da Croce & Nadal, 1992) levando os produtores a se preocupar com novas técnicas de formação de mudas, condução dos ervais, podas, adubação e implantação de ervais puros a pleno sol, porém muito ainda se tem para pesquisar.

2.2 ERVA-MATE : NECESSIDADES NUTRICIONAIS

A exploração de erva-mate consiste em retirar folhas e ramos finos, bem como botões e flores no final da safra, em outubro, o que acarreta uma exportação substancial de nutrientes do sítio (Reissmann *et al.*, 1985). Estudando ervais de Mandirituba-PR, para avaliação das exportações de macronutrientes pela exploração da erva-mate, estes autores verificaram que as concentrações de nitrogênio e potássio aumentaram de forma considerável na biomassa aérea até o mês de outubro (final da safra), quando ocorre a floração e brotação das folhas, na primavera. Este aumento na concentração foi refletido na maior exportação desses elementos durante este período, havendo a seguir uma queda sensível e constante durante a época de formação e maturação dos frutos (Reissmann *et al.*, 1985).

Estudando o quadro sintomatológico de deficiências minerais em mudas de erva-mate, plantadas em vasos tendo como substrato areia lavada, Bellote & Sturion (1985) verificaram que a omissão de nutrientes provocou forte redução no desenvolvimento das plantas, acarretando drástica queda na produção de matéria seca, sendo que os elementos cuja omissão mais influenciaram a perda de biomassa foram, seqüencialmente, $Ca > P > K > Mg > Zn > Cu > Fe$, enquanto a falta de nitrogênio provocou a paralisação do crescimento das mudas.

Wisniewski *et al.* (1996) também estudaram a exportação de nutrientes, porém, em ervais ainda novos, submetidos à primeira poda de formação, confirmando que o nitrogênio é o elemento exportado em maiores quantidades, seguido de potássio, reforçando os resultados de Reissmann *et al.* (1985).

Resultados semelhantes foram obtidos por Lourenço (1997) que avaliou a produtividade de ervais em 20 Municípios, nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Esse autor determinou que a exportação de nitrogênio variou de $19 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}$ de nitrogênio na forma de uréia no sítio de menor produtividade, até um máximo de $539 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}$ de uréia, exportados no sítio de maior produtividade. Nesse estudo, as quantidades exportadas de potássio variaram de um $\text{kg.ha}^{-1}.\text{ano}$ até $388 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}$ de potássio na forma de KCl nos sítios de menor e maior produtividade, respectivamente. A amplitude de variação dos resultados reflete diferenças no tipo de fertilidade do sítio, na densidade de plantas por hectare e nas diferentes técnicas de manejo aplicadas aos ervais.

Os valores de nutrientes exportados pela erva-mate se equivalem aos de algumas culturas agrícolas confrontadas por Reissmann *et al.* (1985). De forma semelhante os valores apresentados por Wisniewski *et al.* (1996) e Lourenço (1997), se equivalem aos das culturas agrícolas estudadas por Reissmann *et al.* (1985), sendo que essas culturas agrícolas recebem, geralmente, altas doses de fertilizantes, visando a reposição das quantidades exportadas do sistema decorrente do processo de colheita.

Em outro estudo, Reissmann *et al.* (1987) quantificaram também a exportação de micronutrientes durante a exploração dos ervais, verificando que o ferro e o manganês são exportados em quantidades significativas, podendo chegar a $1,13 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}$ de ferro e $19,1 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{ano}$ de manganês, considerando-se uma densidade de 1000 árvores por hectare. Os autores ainda destacam que apesar das quantidades serem menores em relação aos macronutrientes, a não reposição desses elementos pode levar a um desequilíbrio do estado nutricional da planta e à conseqüente queda na produção dos ervais.

As exigências nutricionais da erva-mate são bem distintas nas fases de sementeira, viveiro, plantio de formação e produção (Lourenço, 1997). Assim, a concentração dos nutrientes na parte aérea da planta pode sofrer grandes variações

em função da época de avaliação, da qualidade do sítio onde a planta se desenvolve, do compartimento da planta e do estágio de desenvolvimento da mesma, além de respostas diferenciadas em função da fonte ou forma de adubação utilizada (Tabelas 1 e 2).

Como se observa nestas tabelas, a faixa dos teores para todos os elementos são muito amplas, refletindo a heterogeneidade genética da espécie e as diferenças nutricionais em função das causas de variação citadas no parágrafo anterior.

TABELA 1 - TEOR DE MACRONUTRIENTES (g.kg^{-1}) RELATADOS EM LITERATURA NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE PLANTAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DE DIFERENTES CAUSAS DE VARIAÇÃO

Compartimento	Teor (g.kg^{-1})					Fonte
	N	P	K	Ca	Mg	
Folhas	19.2-22.0	1.2-1.7	15.9-18.6	4.3-6.1	3.3-4.2	Reissmann <i>et al.</i> , 1985 ²
Ramos	10.1-12.1	0.6-1.0	9.8-17.0	8.8-11.9	2.3-3.4	
Massa verde ¹	16.0-27.0	1.0-1.8	8.4-26.0	1.9-5.5	2.7 - 6.0	Sosa, 1995 ³
Folhas	17.4	3.3	10.1	6.5	7.9	Wisniewski <i>et al.</i> , 1996
Ramos	9.6	1.5	10.8	5.0	5.0	
Massa verde	18.6-33.6	0.8-2.4	2.5-16.3	2.5 - 7.8	1.2 - 6.0	Lourenço, 1997 ³
Folhas	17.6	2.0	16.9	4.6	3.2	Reissmann <i>et al.</i> , 1997
Folhas	15.0-36.0	0.5-3.2	10.9-25.8	2.9-7.8	3.3-7.8	Reissmann <i>et al.</i> , 1999 ³
Folhas	11.3-27.5	1.0-4.9	8.5-21.0	5.0-7.2	1.7-7.0	Zampier, 2001 ⁴

¹ massa verde = folhas + ramos finos; ² fonte de variação = época do ano; ³ fonte de variação = níveis de produtividade dos locais analisados; ⁴ fonte de variação = formas de adubação

Trabalhando na região de Missiones, na Argentina, Sosa (1995) propôs uma relação entre os níveis de nutrientes no solo e nas plantas, e a produtividade da erva-mate (Tabelas 3 e 4), demonstrando uma relação direta da produtividade com os níveis dos elementos nas plantas e no solo.

Ervais em 20 municípios, de três estados brasileiros também foram classificados em função de suas produtividades alta, média ou baixa (Tabela 5). Os dados, porém, não permitiram o estabelecimento de correlação entre os níveis de nutrientes na planta ou no solo e a produção de biomassa (Lourenço, 1997).

TABELA 2 - TEOR DE MICRONUTRIENTES (mg.kg^{-1}) EM PLANTAS DE ERVA-MATE, RELATADOS EM LITERATURA, EM FUNÇÃO DE DIFERENTES CAUSAS DE VARIAÇÃO.

Compartimento	Teor (mg.kg^{-1})				Fonte
	Cu	Fe	Mn	Zn	
Folhas	20	99	1810	29	Reissmann <i>et al.</i> , 1987 ²
Haste	18	60	588	59	
Massa verde ¹	-	60->100	670->1400	60->127	Sosa, 1995 ³
Massa verde	-	36-284	649-3179	11-76	Lourenço, 1997 ³
Folhas	8-22	25-283	346-3330	7-88	Reissmann <i>et al.</i> , 1999 ³
Folhas	5-9	67-100	127-950	50-174	Zampier, 2001 ⁴

¹- massa verde = folhas + ramos finos; ²fonte de variação= época do ano; ³- fonte de variação = níveis de produtividade dos locais analisados; ⁴- fonte de variação = níveis de fertilização mineral e orgânica.

TABELA 3 - NÍVEIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS DO SOLO NA REGIÃO ERVATEIRA ARGENTINA, EM RELAÇÃO À PRODUTIVIDADE DA ERVA-MATE.

Elemento	Níveis			
	Baixo	Regular	Adequado	Alto
N total (%)	0,10 - 0,15	0,16 - 0,20	0,21 - 0,16	>0,26
P (ppm)	<4,00	4,10 - 8,00	8,10 - 10,00	>10,00
K (meq/100 g)	0,04 - 0,11	0,12 - 0,20	0,21 - 0,30	>0,30
Ca (meq/100 g)	1,05 - 2,20	2,21 - 4,20	4,21 - 6,30	>6,30
Mg (meq/100 g)	0,10 - 0,65	0,66 - 1,00	1,10 - 1,35	>1,35
Al (meq/100 g)	>1,24	1,10 - 1,24	1,10 - 0,06	<0,05
M.O total (%)	1,08 - 2,00	2,10 - 2,70	2,71 - 3,50	>3,50

FONTE: SOSA (1995)

Nitrogênio, além de ser o elemento exportado em maior quantidade durante a colheita é também um dos principais envolvidos na produção de biomassa. Em ensaio realizado em duas localidades na Argentina, com doses crescentes de nitrogênio (0, 100, 200 e 300 kg de N.ha^{-1}) e diferentes densidades de plantas, constatou-se que houve um incremento linear na produtividade com o aumento nas doses de nitrogênio nos povoamentos com densidades superiores a 1900 plantas. ha^{-1} , enquanto em densidades populacionais menores (1000 a 1480 plantas. ha^{-1}) respostas positivas só ocorreram até a dose de 100 $\text{kg de uréia.ha}^{-1}$,

havendo inclusive depressão de crescimento com o uso de doses muito elevadas de N em áreas com baixa densidade populacional (Kricum & Belingheri, 1995).

TABELA 4 – TEOR DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE ERVA-MATE NA REGIÃO ERVATEIRA DA ARGENTINA, EM RELAÇÃO À PRODUTIVIDADE.

Elemento	Níveis de Produtividade		
	Alto	Médio	Baixo
N (g.kg ⁻¹)	27,0	22,0 – 27,0	21,9 – 21,6
P (g.kg ⁻¹)	1,8	1,8 – 1,5	1,5 – 1,4
K (g.kg ⁻¹)	26,0	26,0 – 19,0	18,9 – 8,4
Mg (g.kg ⁻¹)	6,0	6,0 – 4,4	4,4 – 4,0
Al (m g.kg ⁻¹)	398	398 - 256	255 - 117
B (mg.kg ⁻¹)	73	73 - 44	43 - 22
Zn (m g.kg ⁻¹)	127	127 - 61	60 - 29
Fe (m g.kg ⁻¹)	100	100 - 61	60 - 15
Mn (m g.kg ⁻¹)	1.400	1.400 - 671	670 - 390

FONTE: SOSA (1995)

TABELA 5 – TEOR DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE ERVA-MATE NO PARANÁ, SANTA CATARINA E RIO GRANDE DO SUL, EM RELAÇÃO À PRODUTIVIDADE.

Elemento	Níveis de Produtividade		
	Alto	Médio	Baixo
N (g.kg ⁻¹)	20.6-28.5	18.9-33.3	18.6-33.6
P (g.kg ⁻¹)	0.85-1.43	0.90-1.38	0.83-2.40
K (g.kg ⁻¹)	10.2-16.4	2.48-14.0	1.8-16.0
Ca (g.kg ⁻¹)	5.7-6.9	3.3-6.8	2.4-7.7
Mg (g.kg ⁻¹)	3.3-6.0	1.2-5.9	1.6-6.6
Al (m g.kg ⁻¹)	3.4-12.5	5.4-18.4	5.8-17.4
Fe (m g.kg ⁻¹)	36-121	67-332	50-284
Mn (m g.kg ⁻¹)	686-2371	793-3179	649-2768
Zn (m g.kg ⁻¹)	11-67	12-68	15-76

FONTE: Adaptado de LOURENÇO (1997)

Em estudo envolvendo uma toposequência, em plantio de erva-mate com sete anos de idade, as menores concentrações de nitrogênio observadas nas folhas,

coincidiram com menores altura total e tamanho da copa (Fossati & Reissmann, 1997).

Por outro lado, Lourenço *et al.* (1997a) testou duas fontes de nitrogênio, uréia e sulfato de amônio, com diferentes doses e a aplicação de cobertura morta, durante quatro anos e meio, em três tipos de solo, anotando resposta positiva à aplicação de nitrogênio somente em solo de textura média, sendo indiferente a fonte de nitrogênio usada. Estes autores concluíram ainda ser altamente recomendável o uso de cobertura morta nos plantios de erva-mate.

Outros autores, porém, trabalhando com mudas, estabeleceram relação positiva entre a aplicação de nitrogênio e a produção de biomassa. Pintro *et al.* (1998), estudando mudas crescendo por 120 dias em condições controladas, verificaram que enquanto a adição de fósforo e potássio não afetou o desenvolvimento das plantas, os tratamentos nitrogenados aumentaram significativamente a altura, o número de folhas, a área foliar e a produção de biomassa, comparado com a testemunha. De maneira semelhante, Zampier (2001), avaliando mudas crescendo em viveiro, que receberam diferentes doses de NPK e, ou fertilizante orgânico, verificou que nitrogênio foi o elemento limitante à produção de biomassa foliar em erva-mate.

Reissmann *et al.* (1999) fizeram uma análise conjunta de vários experimentos com erva-mate, realizados com diversos tipos de solo e tratos culturais, e diferentes estágios de desenvolvimento das plantas, variando de mudas até plantas adultas em campo, com o objetivo de caracterizar a composição química das folhas da espécie. Foi concluído que o grupo de nutrientes representado por N, K, Ca e Mg apresentam teores dentro da faixa de variação similar ao encontrado para a maioria das espécies florestais tropicais e sub-tropicais, ao passo que alguns elementos apresentam características próprias, como: os baixos teores de fósforo no tecido vegetal, sem a manifestação de sintomas de deficiência; as altas concentrações de alumínio e manganês, os quais chegaram a atingir níveis de 1235 mg.kg⁻¹ para o alumínio e 3330 mg.kg⁻¹ para o manganês; além dos baixos coeficientes da relação Fe/Mn, os quais se apresentam sempre menores que um.

Wisniewski *et al.* (1997) sugerem que erva-mate é uma espécie acumuladora de alumínio e manganês, porém, Reissmann *et al.* (1999), com base

em trabalhos referentes a outras espécies de plantas acumuladoras de alumínio, as quais atingem teores de até $20.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ e nunca abaixo de 900 mg.kg^{-1} independente da época de coleta, propõem que erva-mate seja classificada como espécie tolerante a alumínio, sugerindo que estudos envolvendo esta questão sejam aprofundados.

2.3 FONTES DE N E ALTERAÇÕES NA RIZOSFERA

A rizosfera, definida como o volume de solo influenciado pela atividade das raízes (Hinsinger, 1998), é parte altamente dinâmica do solo, onde se desenvolvem as relações mecânicas, químicas e biológicas entre as raízes da planta, o solo, a pedofauna, a pedoflora e as raízes de outras plantas (Larcher, 2000), permitindo uma exploração direta daquela porção e viabilizando a existência de um microsítio diferenciado do restante.

O sistema radicial em si é dinâmico, ocorrendo grandes variações entre raízes primárias e laterais (Marschner & Römheld, 1983; Marschner *et al.*, 1986; Dinkelaker, *et al.*, 1993), bem como entre o ápice e a zona sub-apical da mesma raiz (Leisen *et al.*, 1990; Gijsman, 1990a; Plassard *et al.*, 1999).

Mudanças nas propriedades químicas da rizosfera induzidas pelas raízes podem ocorrer de várias maneiras, sendo que as principais são: 1) alteração na concentração iônica (esgotamento ou acúmulo) na rizosfera como consequência direta de taxas diferenciadas de absorção de água e nutrientes; 2) mudanças de pH em resposta a fontes de nitrogênio e deficiência de fósforo e ferro; 3) exudação de compostos de baixo peso molecular para melhorar a mobilização de nutrientes – ácidos orgânicos, amino ácidos; 4) excreção de enzimas, tais como fosfatases, para a liberação de nutrientes minerais; e 5) alterações no potencial redox do solo rizosférico (Gregory & Hinsinger, 1999).

O nitrogênio pode ser absorvido na forma de nitrato ou amônio, sendo que a maioria das plantas pode utilizar ambas as formas. Portanto, as duas formas apresentam algumas características em comum: (1) ambos são ativamente absorvidos nas células radiciais a baixas concentrações externas; (2) medições de

influxos indicam a presença de dois sistemas de transporte de alta afinidade (STAA) para NO_3^- (um construtivo e outro induzível) e um STAA para NH_4^+ ; e (3) o influxo de ambos os íons é relacionado com o status de nitrogênio na planta e sujeito à regulação diurna (Glass *et al.*, 2002). Ampla revisão sobre os processos envolvidos na absorção das duas formas de nitrogênio pode ser encontrado em Forde & Clarkson (1999).

Amônio e nitrato representam cerca de 80% do total de cátions e anions absorvidos pelas plantas, sendo que em solos agrícolas a fonte nítrica (NO_3^-) parece ser a mais comum, encontrando-se em concentrações de milimolar, porém, em solos florestais, em condições naturais, as taxas da relação $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ podem chegar a 56:1 (Stark e Hart, 1997). Assim, a forma de suprimento de nitrogênio tem um forte impacto sobre a absorção de outros cátions e anions, sobre o controle do pH celular e sobre o pH rizosférico (Marschner, 1995).

A forma de aplicação de nitrogênio influencia o pH da rizosfera, tanto em culturas anuais como em perenes. Assim, geralmente, a absorção de N-NH_4^+ acarreta um abaixamento do pH, enquanto a absorção de nitrato freqüentemente aumenta o pH rizosférico (Marschner & Hömheld, 1983). A absorção de N-NH_4^+ despolariza fortemente o potencial elétrico da membrana e, portanto aumenta a liberação de H^+ , provocando assim uma acidificação do meio. Por outro lado, na absorção de N-NO_3^- existe um consumo de H^+ do meio externo durante a absorção e uma produção interna de OH^- , durante a redução do N-NO_3^- , que é liberado no meio externo acarretando a elevação do pH rizosférico (Schubert & Yan, 1997). Pilbeam & Kirkby (1992) destacam que embora o pH do solo seja influenciado pela forma do nitrogênio absorvido pelas plantas crescendo naquele substrato, este por sua vez influencia as proporções de N-NO_3^- e de N-NH_4^+ absorvidos. Em meio onde o valor de pH é baixo a absorção de nitrato é estimulada, enquanto em meio com valores altos de pH a absorção de amônio é a favorecida.

A direção (aumento ou diminuição) das mudanças no pH rizosférico é determinada por fatores da planta, enquanto o grau de mudança e sua extensão a partir da superfície da raiz em direção ao solo não rizosférico, é determinado tanto por fatores da planta como do solo. Os fatores de solo mais importantes neste aspecto são a sua capacidade de tamponamento do pH e o pH inicial do solo, enquanto os fatores da planta são a excreção e absorção de H^+ ou HCO_3^- , evolução

de CO₂ pela respiração das raízes, e liberação de exudados radiciais de baixo peso molecular, como ácidos orgânicos e aminoácidos (Marschner & Hömheld, 1996), podendo ser influenciada ainda, pela espécie vegetal e seu incremento em biomassa (Schöttelndreier & Falkengren-Grerup, 1999).

A magnitude destas variações pode oscilar de situações marcantes como a relatada por Larcher (2000), em milho, onde o pH da rizosfera chegou a 7,5 quando submetidos a uma nutrição exclusiva de nitrato e baixou para 4 quando a fonte utilizada foi a forma amoniacal, até mínimas como as relatadas por Zoysa *et al.* (1998) trabalhando com chá (*Camelia sinensis*) que observou variações de apenas 0,2 unidades de pH.

Em *Pinus koraiensis* na China, a adição da fonte N-NH₄ diminuiu o pH rizosférico, enquanto a fonte N-NO₃ aumentou o pH nessa região do solo, sendo que a direção e intensidade da mudança de pH dependeram da fonte de nitrogênio e de sua concentração (Chen *et al.*, 2001b). Trabalhando com *Pseudotsuga menziesii*, Gijsman (1990b) verificou que com a adição de baixos níveis de N-NO₃ (10 a 50 mg.kg⁻¹ TFSA) o solo rizosférico era mais ácido do que o não rizosférico, porém, quando o suprimento de nitrato aumentava ocorria uma elevação do pH rizosférico. Ao mesmo tempo, em plantas nutridas com N-NH₄ as variações eram menores, porém, o pH rizosférico era sempre menor que o do não rizosférico, independente dos níveis de amônio utilizados.

O decréscimo do pH provocado pela fonte N-NH₄ pode provocar um aumento considerável na disponibilidade e absorção de nutrientes com baixa solubilidade como P, Fe, Mn, Cu e Zn (Thomson *et al.*, 1993). Por outro lado, um aumento na concentração externa de N-NO₃ no meio radicial, provocou um aumento na absorção de P, K, Mg e Ca (Cox e Reisenauer, 1973). Hoffmann *et al.* (1994) verificando o efeito de N-NH₄ e N-NO₃ sobre a absorção de fósforo anotaram uma diminuição de até 0,6 unidades no pH rizosférico em relação ao não rizosférico nos tratamentos que receberam a fonte N-NH₄ e uma elevação de até 0,5 unidades na fonte N-NO₃ entre as duas frações de solo. Verificaram ainda, que a um mesmo valor de pH rizosférico, a entrada de fósforo em plantas nutridas com N-NH₄ era o dobro daquela observada em plantas que receberam a fonte N-NO₃, atribuindo esta melhora a efeitos na mobilização do fosfato do solo ou ao aumento na eficiência de absorção de fósforo pelas raízes.

Gahoonia *et al.* (1992), estudando o efeito das fontes N-NH₄ e N-NO₃, em *Lolium perenne*, em dois tipos de solo, verificaram um decréscimo de 1,6 unidades de pH em mudas que receberam a fonte N-NH₄ e um aumento de 0,6 unidades de pH nas mudas nutridas com N-NO₃. Observaram ainda diferentes comportamentos, em função do tipo de solo utilizado. Enquanto no solo tipo Luvisol o decréscimo de pH induzido pela fonte N-NH₄ provocou um aumento na mobilização de P, em comparação com a testemunha, a fonte N-NO₃ não apresentou qualquer efeito. Por outro lado, no solo tipo Oxisol não houve efeito da fonte N-NH₄, enquanto a fonte N-NO₃ aumentou de forma marcante a mobilização de fósforo do solo. Estes autores concluíram que no Luvisol houve uma dissolução de fosfatos de cálcio em função da acidificação do meio, enquanto no Oxisol houve uma mobilização do fosfato adsorvido pela troca de ligações.

Mudas de eucalipto, caracterizadas como pouco exigentes em cálcio e muito tolerantes a alumínio (Neves *et al.*, 1982) apresentaram absorção preferencial de N-NH₄ sobre N-NO₃ (Valle *et al.*, 1984) sendo que Novais & Smyth (1999) destacam que condições que favoreçam a presença de NH₄ sobre NO₃, como ambiente distrófico e baixas temperaturas, deverão proporcionar maior absorção de NH₄ por plantas que se adaptem a estas condições. Destacam ainda que a baixa disponibilidade de fósforo, compatível com solos distróficos, muitas vezes ácidos, acarreta uma absorção preferencial da forma mais disponível no solo, geralmente a amoniacal. Este pode ser o caso da erva-mate que ocorre naturalmente em regiões de clima mais ameno (Oliveira & Rotta, 1985) em solos com baixos teores de P, alta acidez e elevados teores de alumínio (Lourenço, 1997) e que não respondem de forma satisfatória à calagem (Reissmann *et al.*, 1989/1991; Reissmann *et al.*, 1999).

Trabalhando com chá (*Camelia sinensis*), espécie adaptada a solos ácidos, Zoysa *et al.* (1998), verificaram redução de 0,29 unidades de pH na fração rizosférica do solo quando as plantas receberam a fonte N-NH₄ e uma elevação de 0,13 unidades de pH quando nutridas com N-NO₃. Estes autores destacam ainda que a acidificação do meio rizosférico resultou em uma dissolução mais elevada de fósforo, enquanto o aumento do pH provocado pela fonte N-NO₃ reduziu a dissolução de fósforo na rizosfera.

O uso da fonte N-NO₃ estimula a síntese de anions orgânicos, o que resulta em acúmulo de cátions, especialmente o cálcio resultando em um aumento na absorção desse elemento (Tisdale *et al*, 1993).

O potássio sofre grande competição com vários elementos, como reflexo de uma disputa por cargas negativas dentro de células individuais ou da planta como um todo (Engels & Marschner, 1993). Esta competição parece ser especialmente importante com N-NH₄, sendo que os efeitos prejudiciais na absorção, tanto de potássio como de cálcio, são mais comuns quando o pH do meio de crescimento é muito ácido (Pilbeam & Kirkby, 1992). Esta competição, porém, nem sempre ocorre, Dieffenbach & Matzner (2000) trabalhando com árvores maduras de *Picea abies* observaram um esgotamento de NH₄ e um acúmulo de potássio no solo rizosférico daquelas plantas. Aqueles autores argumentaram que a concentração de potássio era muito superior à de NH₄ no solo não rizosférico e que, portanto, apesar do acúmulo de potássio na rizosfera isto não implicava em inibição da absorção de potássio pela presença de NH₄.

Majdi & Persson (1995), trabalhando com sulfato de amônio, em *Picea abies*, detectaram aumento significativo na concentração de magnésio na rizosfera e associaram este aumento à tese de que a absorção de amônio compete de maneira intensa com a absorção de cátions, especialmente o magnésio, podendo inclusive provocar um efluxo deste elemento das raízes.

Alterações de pH influenciam de forma dramática a solubilidade, a concentração na solução do solo, a forma iônica, a mobilidade e portanto a disponibilidade de micronutrientes para as raízes das plantas (Marschner & Römheld, 1996). Em amplo trabalho de revisão, estes autores destacam que, como regra, com a diminuição do pH do solo existe um aumento na disponibilidade de zinco, manganês e em um menor grau a de ferro, enquanto a disponibilidade de molibidênio diminui e cobre, que é predominantemente ligado a matéria orgânica, não apresenta relação clara entre o pH do solo e sua solubilidade.

A concentração de manganês nas plantas pode ser drasticamente alterada por mudanças no pH rizosférico. Friedrichsen (1967)¹ citado por Marschner & Römheld (1996), verificou que a concentração de manganês em plantas aumentava

drasticamente se a fonte N-NO₃ era utilizada, quando o substrato de cultivo era areia, porém, quando o substrato usado era o solo, estas altas concentrações ocorriam quando do uso da fonte N-NH₄. As alterações na concentração de manganês nas plantas foram associadas à alterações no pH rizosférico decorrente da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio.

O zinco é constituinte de diversas enzimas, atuando ainda na ativação de outras, na formação da clorofila, no metabolismo de carboidratos, na síntese e degradação de proteínas e na biossíntese de reguladores de crescimento, especialmente auxinas (AIA em particular) além de possuir uma função estrutural na manutenção da integridade das membranas (Malavolta, 1980; Marschner, 1995), tendo tendência de acúmulo nas raízes e parte aérea (Larcher, 2000). A queda do pH rizosférico provocado pelo suprimento da fonte N-NH₄ e conseqüente aumento na solubilidade de zinco no solo e aumento da concentração de zinco na planta, pode ser vantajoso em solos com baixa disponibilidade de zinco, mas em situações de alta disponibilidade do elemento, pode haver elevação dos teores acima do ótimo e provocar depressão de crescimento provocada pela toxidez por zinco (Marschner & Römheld, 1996). Não existem relações claras entre zinco e diferentes fontes de nitrogênio, embora a deficiência de zinco possa provocar acúmulo de N-NO₃ nas plantas, indicando uma participação no processo de redução do nitrato (Malavolta *et al.*, 1997).

2.4 FONTES DE N E PRODUÇÃO DE BIOMASSA

A relação entre nitrogênio e o acúmulo de biomassa em culturas, é baseado na inter-regulação de múltiplos processos fisiológicos na cultura. Entre estes processos, a absorção de nitrogênio, a assimilação de carbono, e a alocação de carbono e nitrogênio entre os órgãos das plantas e entre plantas apresentam um papel primordial. Em condições não adequadas de suprimento de nitrogênio, a absorção de nitrogênio depende da disponibilidade e da distribuição de nitrogênio mineral, além da distribuição das raízes. Enquanto em condições de suprimento

¹. Friedrichsen, J. (1967) Ursachen von Säureschaden an Kulturpflanzen auf Böden Schleswig-Holsteins. PhD dissertation, Kiel University, Germany.

ótimo de nitrogênio a absorção depende da taxa de crescimento, controlada internamente pela planta (Gastal & Lemaire, 2002).

O uso das diferentes formas de adubação nitrogenada provoca distintas reações na rizosfera e, portanto influencia de modo não uniforme a capacidade de absorção dos elementos minerais pelas plantas. Stulen *et al.* (1993) haviam verificado que a distribuição de matéria seca entre raiz e parte aérea parece não ser influenciada quando nitrogênio não é limitante, enquanto o crescimento radicial é favorecido quando o nitrogênio é limitante. Diminuição na proporção R/A também foi observada em mudas de coníferas (Kozlowski *et al.*, 1991) e de *Bétula pendula* (Ericsson, 1995) que receberam altas doses de nitrogênio. A fonte de nitrogênio foi, ainda, o único fator que resultou em mudanças significativas na alocação de biomassa entre as raízes e a parte aérea de plantas de *Bétula alleghaniensis* e de *Pinus strobus*. Enquanto plantas, das duas espécies, nutridas com N-NH₄ tiveram um aumento em biomassa 57% superior àquelas crescendo com a fonte N-NO₃, as nutridas com N-NO₃ alocaram 53% mais biomassa às raízes do que as crescendo com N-NH₄ (Bauer & Berntson, 2001).

Mudas de *Pinus radiata* submetidas a diferentes formas de nitrogênio apresentaram maiores altura, peso seco aéreo e quantidade total de cobre e boro quando receberam uma fonte de nitrogênio amoniacal, enquanto plantas que receberam a fonte nítrica apresentaram maiores concentrações de ferro, as raízes possuíam uma coloração mais escura, eram mais ramificadas e mais finas do que as que receberam a fonte amoniacal (Olykan & Adams, 1995). Outro ensaio envolvendo *Tsuga heterophylla* e diferentes fontes de nitrogênio mostrou que nitrogênio amoniacal era absorvido mais rápido do que a fonte nítrica, e concluiu-se que aquela espécie era mais adaptada a sítios com predominância de nitrogênio amoniacal (Knoepp *et al.*, 1993). De forma semelhante, Malagoli *et al.* (2000) verificaram que *Pinus silvestris* e *Larix decidua* utilizaram preferencialmente N-NH₄ ao invés de N-NO₃, sendo que as taxas de absorção de amônio foram aproximadamente seis vezes superiores às de nitrato.

De maneira oposta, Gijsman (1990a) estudando diferentes fontes e níveis de nitrogênio sobre a absorção de nutrientes por Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), em solos ácidos, verificou que o suprimento da fonte N-NH₄ como única fonte de nitrogênio para a espécie provocou uma forte diminuição do excedente total

de cátions inorgânicos em relação ao total de ânions inorgânicos, o que poderia levar, no longo prazo, a uma acidificação interna da planta, a concentrações tóxicas de N-NH_4 livre e um desbalanceamento na composição de aminoácidos. Além disso, a produção de biomassa de plantas nutridas com a fonte N-NO_3 foi sempre, aproximadamente, o dobro das obtidas pela fonte amoniacal.

Cox & Reisenauer (1973) estudando o efeito de doses e formas de nitrogênio sobre o desenvolvimento de trigo, verificaram que taxas de absorção de N-NH_4 excedendo $100 \mu\text{mol.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ reduziram a taxa de crescimento das plantas, porém, em taxas menores o desenvolvimento de plantas nutridas com N-NH_4 foi equivalente ou um pouco superior do que as plantas supridas com concentração equivalente de N-NO_3 . Observaram ainda uma diminuição na concentração de fósforo em plantas supridas com N-NH_4 , porém, um aumento na concentração de N-NH_4 no meio radicial, provocou um aumento nas concentrações de nitrogênio, fósforo e enxofre e uma diminuição nas de potássio, cálcio e magnésio nas plantas. O aumento na concentração de N-NO_3 provocou efeito inverso, ou seja, aumento nas concentrações de fósforo, potássio, magnésio e cálcio, sendo que as taxas mais elevadas de magnésio e cálcio foram atribuídas a uma redução na competição durante o processo de absorção.

2:5 FONTES DE N E FOTOSÍNTESE LÍQUIDA

Dentro de uma espécie, a capacidade fotossintética é altamente correlacionada com a concentração de nitrogênio nas folhas, devido à grande fração de nitrogênio foliar alocado no aparato fotossintético (Hikosaka & Hirose, 2000).

A aplicação de diferentes fontes de nitrogênio pode afetar o crescimento das plantas via inúmeros processos ocorrendo no solo, no sistema solo/planta e dentro das plantas (Wiesler, 1997). Porém, mesmo quando plantas crescem de forma similar, tanto com a fonte N-NO_3 quanto com N-NH_4 , elas podem diferir em muitos aspectos em relação à sua atividade metabólica e composição iônica, como resultado das diferentes respostas fisiológicas (Kandlbinder *et al.*, 1997).

O nitrogênio da rizosfera, absorvido pelas células epidérmicas das raízes, é assimilado em plastídios de tecidos fotossintéticos ou não fotossintéticos e transferido para local de síntese de diferentes componentes. Estes três processos (absorção, assimilação e transferência) exigem grande quantidade de energia. Para a redução de nitrato a nitrito e a amônio, precisa-se da transferência de oito elétrons, que na economia da planta como um todo representa em torno de 20-25% dos gastos energéticos nas espécies não fixadoras de nitrogênio (Bloom, 1997). O NH_4 produzido pela redução de NO_3 ou pela fotorrespiração, é inicialmente fixado por um N-amido (Krömer, 1995) e posteriormente incorporado em outros componentes (Oaks, 1994). A redução de NO_3 nas plantas utiliza grande quantidade de poder redutor. Do ponto de vista do aumento da necessidade de energia bioquímica para a redução de NO_3 , poderia-se supor que as plantas NH_4 crescem mais que as NO_3 , mas na maioria dos casos ocorre o oposto, podendo haver inclusive modificação na arquitetura das plantas de crescimento rápido (Beltrano *et al.*, 1999).

A transferência de nitrogênio das raízes para as folhas ocorre de diferentes formas e a sua incorporação a diferentes aminoácidos, proteínas e outros componentes contendo nitrogênio é diferenciado para cada espécie e fase de desenvolvimento (Pate, 1973). Em geral, o NH_4 absorvido do solo é assimilado rapidamente em aminoácidos ou outro composto nitrogenado para subsequente transporte para a parte aérea, enquanto o NO_3^- que é absorvido pode ser reduzido nas raízes, armazenado nos vacúolos das raízes ou transportado para parte aérea da planta no xilema (Layzell, 1990). Em geral considera-se que plantas herbáceas assimilam preferencialmente o nitrato nas folhas e as plantas arbóreas nas raízes (Maillard *et al.*, 2000).

O limite para absorção e assimilação de nitrato e de amônio pode ser primariamente o metabolismo de carbono (dependente da radiação e fotossíntese), para a formação do esqueleto carbônico de aminoácidos, bem como os próprios metabólitos de nitrogênio, atuando na repressão da assimilação (Imsande & Touraine, 1994). Por outro lado, pelas equações de Farquhar *et al.* (1980), com temperatura e concentração de CO_2 constantes, a fotossíntese pode ser limitada pela radiação (em radiação fotossinteticamente ativa) e pelo conteúdo de nitrogênio (Paul & Foyer, 2001). Na construção do modelo de dinâmico de alocação na planta, Soussana *et al.* (2000) usaram a hipótese de uma co-limitação de crescimento pela

luz e pelo nitrogênio mineral. Eles consideram que estes dois recursos independentes seriam usados para construção de compartimentos estruturais (parte estrutural aérea, parte radicular e proteínas foliares), entre os quais são estabelecidos os relacionamentos de coordenação de absorção de nitrogênio e de fotossíntese.

A absorção do anion nitrato deve ser balanceada ou pela absorção de cátions (K, Mg, entre outros) ou pela excreção de outro anion (OH^- ou HCO_3^-) para manter a eletroneutralidade dentro da planta (Layzell, 1990).

O reservatório de N-NH_4 dentro da planta é formado pelas frações: absorvida da solução do solo; originada no processo de assimilação da fonte N-NO_3 ; originada pelo metabolismo fotorespiratório do nitrogênio; e nas espécies leguminosa durante o processo de fixação do N_2 . Alguns estudos mostram uma diminuição da superfície das folhas de plantas supridas com N-NH_4 (Lips et al., 1990; Raab & Terry, 1994), embora isto não signifique necessariamente uma diminuição da fotossíntese líquida por unidade de área (Takács & Técsi, 1992).

Claussen & Lenz (1999) destacam que a fotossíntese líquida pode diminuir ou aumentar quando plantas são nutridas com nitrogênio amoniacal, dependendo tanto da espécie como do pH da solução nutriente. Os mesmos autores discutem que plantas de origem de solos ácidos, com alto teor de matéria orgânica, podem aumentar tanto a assimilação líquida, quanto o conteúdo de clorofila com a aplicação de N-NH_4 . Seu exemplo foi *Vaccinium corymbosum*, espécie de origem de solos ácidos, que não reage positivamente à correção de solo com CaCO_3 . Erva-mate cresce bem mesmo em solos ácidos com pH (CaCl_2) de 3,8 (Lourenço, 1997) e também não responde positivamente à calagem (Reissmann et al., 1989/1991; Pinto et al., 1998).

Nitrato e amônio apresentam diferentes efeitos sobre vários processos bioquímicos e fisiológicos na planta, sendo que em altas concentrações isto pode levar a diferenças marcantes nas respostas em crescimento. A maioria das espécies mostra redução de crescimento, folhas menores e diminuição de crescimento do sistema radicial quando expostas a altas concentrações de N-NH_4 podendo levar a clorose em casos extremos (Gerendás et al., 1997). Cox e Reisenauer (1973) destacam que existe uma conservação de energia na absorção de N-NH_4 quando

comparado com a absorção de $N-NO_3$ devido ao fato de $N-NH_4$ não necessitar de redução. Destacam ainda, que o suprimento de $N-NH_4$ em baixas concentrações pode provocar um aumento de crescimento nas espécies por ser mais prontamente absorvido, porém, as plantas não toleram ou toleram muito pouco o excesso de $N-NH_4$ interno, sendo que pequenas quantidades em excesso podem provocar reações tóxicas e acarretar a diminuição das taxas de crescimento. O excesso de $N-NO_3$ por sua vez é tolerado em grandes quantidades.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Foram instalados três experimentos em seqüência. Cada experimento foi montado individualmente. Assim, somente após a coleta e a análise dos dados do primeiro experimento é que o segundo foi planejado e instalado. De maneira semelhante, o terceiro experimento só foi planejado e instalado após a coleta e a análise do segundo.

3.2 LOCALIZAÇÃO

Todos os experimentos foram instalados e conduzidos, em casa de vegetação, no Centro Nacional de Pesquisa de Florestas - EMBRAPA.

3.3 EXPERIMENTO 1

3.3.1 Instalação e Condução do Experimento

3.3.1.1 Produção e seleção de mudas

As mudas de erva-mate, foram produzidas comercialmente pela Ervateira Bitumirim, no município de Ivaí-PR, a partir de sementes coletadas de erva-mate selecionadas para alta produção de folhas e baixa produção de sementes.

As mudas, com quatro meses de idade, após o repique, crescendo em sacos de polietileno, foram selecionadas fenotipicamente considerando-se a altura, a arquitetura da planta e a isenção de pragas e doenças.

3.3.1.2 Preparo e transplante das mudas

As mudas foram desmontadas e suas raízes lavadas para a retirada de todo o substrato original. A seguir, as raízes foram podadas deixando-se cerca de 50% de sua biomassa inicial.

As mudas assim preparadas foram transplantadas, com raiz nua, para recipientes de PVC, com capacidade para 1,3 kg de solo, equivalente a aproximadamente 2,5 litros de solo (Figura 1).

O solo usado para o enchimento dos recipientes foi um CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A proeminente, textura argilosa, relevo ondulado, substrato de formação Argilitos e Arcósios, coletado sob plantação de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, na camada de 0 - 20 cm de profundidade. O mesmo foi passado por peneira de 2 mm de malha e seco ao ar (TFSA) e determinadas a umidade atual e a capacidade de retenção de água do mesmo.

Foi retirada uma amostra composta para a caracterização química (Tabela 6) e física do solo. Em termos físicos o solo apresentava 40% de argila, 20% de areia fina, 17% de areia grossa (areia total = 37%) e 23% de silte.

3.3.1.3 Delineamento experimental

Após o transplante para os recipientes, as mudas cresceram por 60 dias, sem nenhum tratamento. Ao final deste período as mudas foram agrupadas seguindo-se um delineamento de blocos ao acaso, com três tratamentos, três repetições e 16 plantas por parcela, totalizando 48 plantas por tratamento e 144 plantas no total.

As mudas foram agrupadas mantendo-se uma uniformidade visual em termos de variação de tamanho e aspecto geral, nos blocos e nas parcelas.

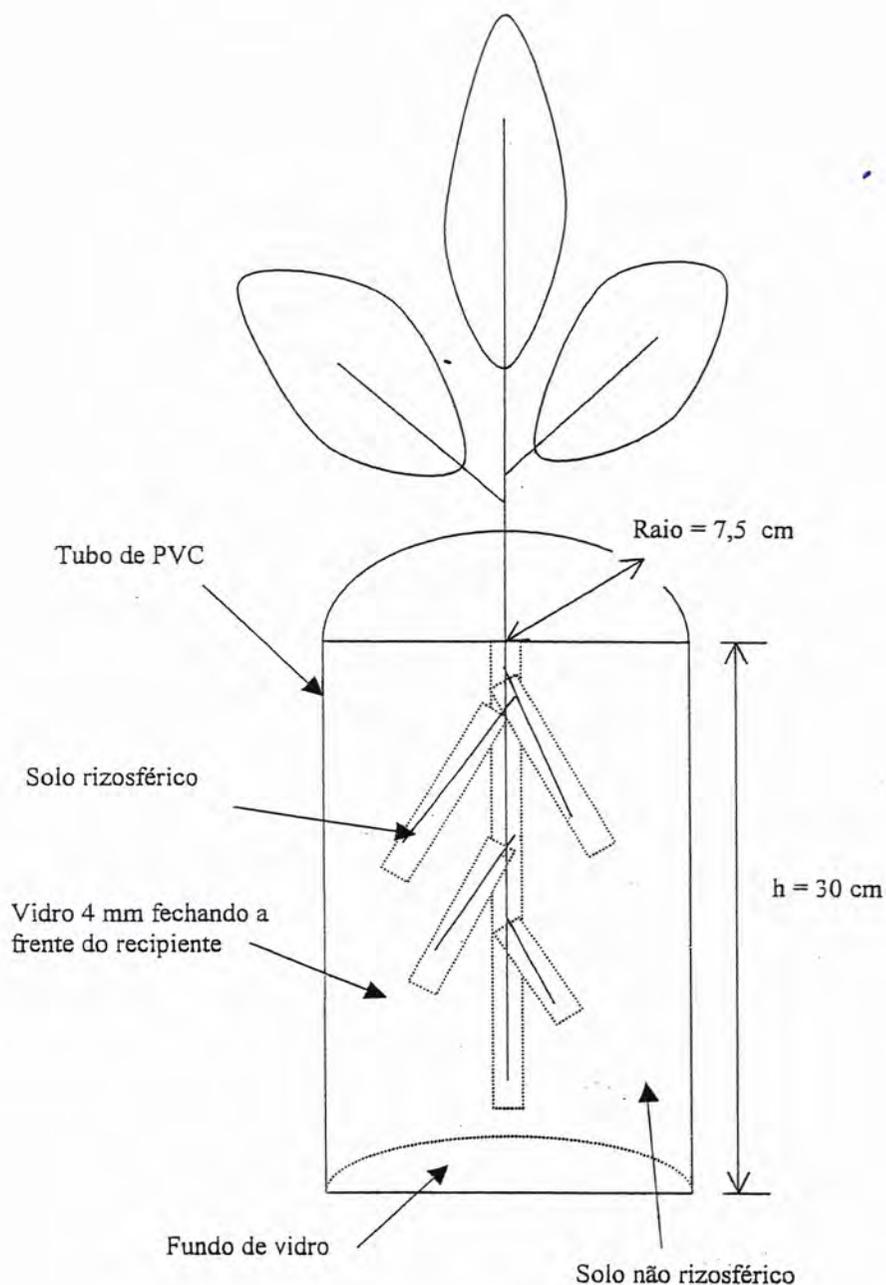


FIGURA 1. ESQUEMA DO RECIPIENTE USADO NOS DOIS PRIMEIROS EXPERIMENTOS

TABELA 6: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 1:

pH	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ca+Mg	Al^{3+}	H+Al	MO	P	Na^+
CaCl ₂	cmol _c /dm ³						g/dm ³	mg/dm ³	
4,92	0,11	5,52	4,00	9,52	-	7,13	89,18	5,30	20,00

3.3.1.4 Tratamentos

Os seguintes tratamentos foram aplicados: T1 – testemunha, sem adição de nitrogênio; T2- NH_4 , aplicação de 120 mg N.kg^{-1} TFSA na forma amoniacal; e T3 - NO_3 , aplicação de 120 mg N.kg^{-1} TFSA na forma nítrica. Foram desenvolvidas soluções para cada tratamento, mantendo-se a mesma concentração dos elementos, exceção feita ao nitrogênio na testemunha (Tabela 7).

TABELA 7. PRODUTOS QUÍMICOS USADOS E AS RESPECTIVAS QUANTIDADES DE NUTRIENTES CONTIDAS NOS MESMOS, NECESSÁRIOS PARA UM QUILOGRAMA DE SOLO SECO.

Produto	Peso ⁽¹⁾	N	P ⁽²⁾	K ⁽³⁾	Ca	Mg	S	Cl	Na
Solução Testemunha (-N)									
KH_2PO_4	115	-	26.2	33	-	-	-	-	-
$\text{MgSO}_4.7\text{H}_2\text{O}$	580	-	-	-	-	57.2	75.5	-	-
Na_2SO_4	306	-	-	-	-	-	68.7	-	98.5
NaCl	250	-	-	-	-	-	-	151.9	98.6
CaCO_3	286	-	-	-	114.5	-	-	-	-
Na_2CO_3	151	-	-	-	-	-	-	-	65.5
TOTAL (-N)		0	26.2	33	114.5	57.2	144.2	151.9	262.6
Solução Amoniacal (NH_4)									
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	283	60	-	-	-	-	68.7	-	-
NH_4Cl	229	60	-	-	-	-	-	151.9	-
KH_2PO_4	115	-	26.2	33	-	-	-	-	-
$\text{MgSO}_4.7\text{H}_2\text{O}$	580	-	-	-	-	57.2	75.5	-	-
CaCO_3	286	-	-	-	114.5	-	-	-	-
Na_2CO_3	605	-	-	-	-	-	-	-	262.6
TOTAL (NH_4)		120	26.2	33	114.5	57.2	144.2	151.9	262.6
Solução Nítrica (NO_3)									
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2.6\text{H}_2\text{O}$	366	40	-	-	-	34.6	-	-	-
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2.6\text{H}_2\text{O}$	777	80	-	-	114.5	-	-	-	-
KH_2PO_4	115	-	26.2	33	-	-	-	-	-
$\text{MgSO}_4.7\text{H}_2\text{O}$	229	-	-	-	-	22.6	29.8	-	-
Na_2SO_4	509	-	-	-	-	-	114.4	-	164.0
NaCl	251	-	-	-	-	-	-	151.9	98.6
TOTAL (NO_3)		120	26.2	33	114.5	57.2	144.2	151.9	262.6

¹ -Peso em mg dos produtos químicos ; ² - equivalente a 60 mg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ solo; ³ - equivalente a 40mg de $\text{K}_2\text{O}/\text{kg}$ solo

As soluções tiveram o pH ajustado para 6.0 utilizando-se NaOH 1N para a solução nítrica e H₂SO₄ 2N para as soluções testemunha e amoniacal. Os tratamentos foram aplicados em duas etapas, sendo a segunda 10 dias após a aplicação da primeira.

A partir da aplicação dos tratamentos, o solo dos vasos foi mantido com a umidade entre 60 e 70% da capacidade máxima de retenção de água, controlando-se o peso dos vasos e irrigando-se periodicamente com água destilada.

3.3.1.5 Período de condução do experimento

O experimento foi conduzido no período de setembro de 2001 a janeiro de 2002, correspondente às estações primavera e verão.

3.3.2 Coleta do Experimento e Preparo das Amostras

3.3.2.1 Amostras de solo

O experimento foi coletado 50 dias após a aplicação da segunda dose dos tratamentos, coletando-se separadamente amostras das frações não rizosférica e rizosférica do solo.

A separação das duas frações de solo foi feita através da retirada cuidadosa do substrato do vaso com esboroamento manual do mesmo. O solo facilmente desprendido das raízes, das mudas componentes de uma parcela, era coletado em bandeja e considerado o solo não rizosférico. As raízes com solo ainda aderido eram, então, colocadas em outra bandeja e submetidas a uma ação mais vigorosa até que todo o solo que havia permanecido aderido às mesmas, após o manuseio inicial, tivesse se soltado. Esta fração foi denominada de fração rizosférica do solo.

O solo coletado em cada fração, em cada parcela, foi homogeneizado e alíquotas foram extraídas para a determinação dos atributos químicos e físicos das mesmas.

3.3.2.2 Amostras vegetais

A planta foi dividida nos compartimentos: raiz, caule, folhas novas (folhas emitidas após a aplicação dos tratamentos) e folhas velhas (folhas existentes previamente à aplicação dos tratamentos). A divisão em compartimentos foi realizada visando determinar a distribuição, na planta, dos nutrientes absorvidos a partir da aplicação dos tratamentos.

O material vegetal de cada parcela foi agrupado, originando uma única amostra para cada compartimento, por parcela. O material vegetal foi lavado em água corrente, seco com toalha de papel e levado para secagem em estufa de circulação forçada, a 60°C, até massa constante, quando foram pesados e os valores anotados.

Assim, foram determinadas a seguir as massas da matéria seca das raízes, dos caules, das folhas novas e das folhas velhas. Com base nestes resultados foram determinadas a biomassa aérea total (soma das massas de caules, folhas novas e folhas velhas), a relação biomassa radicial / biomassa aérea (R/A) e a biomassa total da planta (soma da biomassa de todos os compartimentos).

3.3.3 Análises Químicas e Físicas

A biomassa, após o preparo descrito acima, de cada um dos compartimentos aéreos, caule, folha nova e folha velha foram moídos separadamente, para em seguida serem analisados. Todas as análises de planta e solo foram realizadas no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas, do Centro Nacional de Pesquisa de Florestas/EMBRAPA.

Na análise do material vegetal, se utilizou a digestão nitro-perclórica para os elementos P, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, e digestão sulfúrica micro Kjeldal para nitrogênio. As determinações foram realizadas utilizando-se destilação e titulação

para nitrogênio, colorimetria para P, fotometria de chama para K e espectrofotometria de absorção atômica - chamas, para Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn.

As análises físicas do solo seguiram a metodologia contida no Manual de Métodos e Análise de Solos (EMBRAPA, 1979). Do mesmo modo, as análises químicas de solo seguiram os métodos descritos no Manual de Métodos e Análise de Solos da EMBRAPA (1979). O pH foi determinado em CaCl_2 , o fósforo disponível e o potássio trocável foram extraídos com HCl 0,05 N + H_2SO_4 0,025 N, o cálcio, o magnésio e o alumínio trocáveis foram extraídos com KCl 1N.

3.3.4 Análise Estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e as médias dos parâmetros analisados foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de até 10% de probabilidade. A utilização do nível de 10% de probabilidade foi adotada em função da grande variabilidade genética da erva-mate, associada ao fato do Teste de Tukey ser bastante rigoroso na comparação de médias, especialmente quando se trabalha com um número reduzido de graus de liberdade na análise estatística.

3.4 EXPERIMENTO 2

3.4.1 Instalação e Condução do Experimento

3.4.1.1 Produção, preparo e transplante das mudas

As mudas deste segundo experimento, com oito meses de idade, após o repique, foram produzidas comercialmente, em tubetes, no viveiro do Centro Nacional de Pesquisa de Florestas - EMBRAPA, no município de Colombo-PR.

As mudas foram selecionadas usando-se os mesmos critérios adotados no primeiro experimento (sub-ítem 3.3.1.1). O preparo das mudas, o transplante, o tipo

de recipiente e o tipo de solo, foram os mesmos adotados no primeiro experimento (sub-ítem 3.3.1.2).

O resultado da análise química do solo é apresentado na Tabela 8. Em termos físicos o solo apresentava 42% de argila, 21% de areia fina, 18% de areia grossa (areia total = 39%) e silte 19%.

TABELA 8: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO USADO NO EXPERIMENTO 2

pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca+Mg	Al ³⁺	H+Al	MO	P	Na ⁺
CaCl ₂	cmol _c /dm ³						g/dm ³	mg/dm ³	
5,15	0,05	5,98	3,28	9,26	0,13	8,14	81,59	3,70	7,00

3.4.1.2 Delineamento experimental

Após o transplante para os recipientes, as mudas cresceram por 80 dias, sem nenhum tratamento. Ao final deste período as mudas foram agrupadas seguindo-se um delineamento de blocos ao acaso, com três repetições, quatro tratamentos e 16 plantas por parcela, com duas coletas de dados, aos 10 e 25 dias após a aplicação dos tratamentos, totalizando 48 plantas por tratamento e 192 plantas no total do experimento.

3.4.1.3 Tratamentos

Ao invés da solução nutritiva usada no primeiro experimento, foi efetuada a aplicação de uma solução de equilíbrio com 20 mg de N.kg⁻¹ TFSA, na forma de nitrato de amônio (NH₄NO₃), 60 mg de P₂O₅ e 40 mg de K₂O. kg⁻¹ TFSA, na forma de di-hidrogênio fosfato de potássio (KH₂PO₄), para todas as mudas, a fim de proporcionar um nivelamento nutricional das mudas. Quinze dias após a aplicação desta solução de equilíbrio foi efetuada a aplicação dos tratamentos.

Incluiu-se, neste experimento, um tratamento composto pela fonte uréia. Assim, os tratamentos foram: T1 = Testemunha, sem aplicação adicional de N mineral; T2 = NO₃, aplicação adicional de 100 mg N/kg de TFSA na forma de

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; T3 = uréia, aplicação adicional de 100 mg de N/kg TFSA, na forma de uréia; e T4 = NH_4 , aplicação adicional de 100 mg de N/kg de TFSA, na forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Os tratamentos foram aplicados em uma única etapa. Cabe destacar que os 20 mg de N da solução de equilíbrio, somado aos 100 mg de N aplicado com os tratamentos completam os 120 mg N.kg^{-1} TFSA utilizados no primeiro experimento.

3.4.1.4 Período de condução do experimento

O experimento foi conduzido no período de março a julho de 2002, durante o outono.

3.4.2 Coleta do Experimento e Preparo das amostras

3.4.2.1 Tempo de condução do experimento

O tempo de condução do experimento foi reduzido de 60 dias para 25 dias e as coletas foram realizadas em duas etapas, aos 10 e 25 dias após a aplicação dos tratamentos.

A redução no tempo do experimento, e a divisão em duas observações, tiveram por objetivo acompanhar a evolução das alterações no solo provocadas pelas diferentes fontes de N, em vista destas ocorrerem de forma muito rápida no solo. Ao mesmo tempo pretendia-se determinar a influência dos tratamentos na produção de biomassa aérea e em sua composição química. Assim, por experiência anterior optou-se pelo prazo mínimo de 10 dias para que fosse possível a coleta de biomassa suficiente, especialmente no compartimento folhas novas, para a realização das análises para a determinação da composição química das mesmas.

3.4.2.2 Coleta das amostras de solo e planta

A coleta do experimento ocorreu em duas etapas, aos 10 e 25 dias, sendo que em cada etapa foi coletada a metade das plantas de cada parcela. Os procedimentos de coleta e preparo de amostras de solo e plantas foram os mesmos adotados no primeiro experimento (sub-ítem 3.3.2.1 e 3.3.2.2). Foram mantidas a coleta separada das duas frações de solo e no material vegetal foi respeitada a divisão em compartimentos .

3.4.3 Análises Químicas e Estatísticas

Os procedimentos e análises químicas do solo e do material vegetal, foram os mesmos utilizados no primeiro experimento (sub-ítem 3.3.3).

De forma semelhante as análises estatísticas realizadas seguiram os mesmos procedimentos relatados no sub-ítem 3.3.4.

3.5 EXPERIMENTO 3

3.5.1 Instalação e Condução do Experimento

3.5.1.1 Produção, preparo e transplante das mudas

As mudas utilizadas no terceiro experimento foram produzidas comercialmente pela Ervateira Vier, do município de São Mateus do Sul-PR. As mudas, com seis meses de idade após o repique, crescendo em sacos de polietileno foram selecionadas obedecendo-se os mesmos critérios estabelecidos no sub-ítem 3.3.1.1 e preparadas para transplante, conforme descrito no sub-ítem 3.3.1.2.

As mudas preparadas foram transplantadas para sacos de polietileno, com 1,2 litros de capacidade, enchidos com o solo de estudo. O solo usado neste terceiro

experimento foi um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A proeminente, textura média e relevo ondulado, cujas características químicas estão apresentadas na Tabela 9. Em termos físicos, o solo apresentava 33% de argila, 20% de areia fina, 24% de areia grossa (areia total = 44%) e 23% de silte.

TABELA 9: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO USADO NO EXPERIMENTO 3.

pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca+Mg	Al ³⁺	H+Al	MO	P	Na ⁺
CaCl ₂	cmol _c /dm ³						g/dm ³	mg/dm ³	
4,00	0,09	0,97	1,34	2,31	2,38	8,50	24,99	1,00	7,00

3.5.1.2 Delineamento experimental

Após o transplante as mudas cresceram por 35 dias, sem nenhum tratamento. Ao final deste período as mudas foram agrupadas seguindo-se um delineamento de blocos ao acaso, com quatro tratamentos, três repetições, doze plantas por parcela, com duas coletas de dados, aos 10 e 25 dias após a aplicação dos tratamentos, totalizando 36 mudas por tratamento e 144 no total.

3.5.1.3 Tratamentos

Ao final dos 35 dias as mudas receberam a mesma solução de equilíbrio usada no segundo experimento (sub-ítem 3.4.1.3). As mudas cresceram por mais 30 dias após a aplicação da solução de equilíbrio, recebendo a seguir os tratamentos.

Os tratamentos adotados neste experimento foram os mesmos usados no segundo experimento, conforme descrito no sub-ítem 3.4.1.3.

3.5.1.4 Período de condução do experimento

O experimento foi conduzido de setembro a dezembro de 2002, durante a primavera.

3.5.2 Condução do Experimento e Preparo das Amostras

3.5.2.1 Coleta de amostras de solo e planta

O experimento foi coletado em duas etapas, aos 10 e 25 dias, coletando-se metade das mudas em cada etapa. Os procedimentos de coleta e preparo de amostras de solo e plantas foram os mesmos adotados no primeiro experimento (sub-ítem 3.3.2.1 e 3.3.2.2). Foi mantida a coleta separada das duas frações de solo e no material vegetal foi respeitada a divisão em compartimentos .

3.5.2.2 Avaliação das características morfológicas e da fotossíntese

A fim de correlacionar os efeitos dos tratamentos aplicados com os parâmetros fisiológicos, efetuou-se o acompanhamento das características morfológicas e da fotossíntese líquida das plantas.

Para isto, foram selecionadas oito mudas de cada tratamento, apresentando de oito a dez folhas, com características fenotípicas semelhantes em termos de arquitetura da muda e tamanho de folhas.

Antes da aplicação dos tratamentos foi realizada a primeira avaliação das características morfológicas e da fotossíntese líquida das mudas,. As folhas foram marcadas para que as mesmas fossem reavaliadas nas coletas seguintes. Na observação 1 foi marcada a última folha madura, equivalente à folha completamente expandida, que foi denominada de "velha". Na segunda observação foi marcada, adicionalmente, uma das folhas novas emitidas, ainda em crescimento (não completamente expandida), que foi denominada de "jovem".

3.5.2.2.1 Características morfológicas

Os parâmetros morfológicos: altura da planta (cm), comprimento de cada entrenó (cm), comprimento e largura de folhas (cm), medidos com régua, além do estado fisiológico de cada folha (madura ou nova) e número de folhas foram avaliados três vezes, em:

- Observação 1: 15 dias após a aplicação da solução de equilíbrio, e previamente à aplicação dos tratamentos nitrogenados, em todas as plantas e antes de aplicação de diferentes fontes de nitrogênio (no final de outubro 2002) (**Início**)
- Observação 2: depois de 10 dias da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio (**10 dias**),
- Observação 3: depois de 25 dias da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio (**25 dias**).

Medições de comprimento e largura de folhas foram usados para avaliação de área foliar (cm²), não para exprimir o valor absoluto, mas para comparação entre os tratamentos. Duas semanas antes de procedimento de todas as medições, as mudas foram liberadas das primeiras pequenas folhas de baixo, até 5cm de altura, para uniformizar as plantas e o número inicial das folhas.

3.5.2.2.2 Avaliação da taxa de fotossíntese líquida

A fotossíntese líquida, expressa em $\mu\text{mol de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, foi medida com o medidor de fotossíntese LI-6200 (LICOR, EUA), procedendo 4 medições programadas para cada folha, cada uma com duração de 5 segundos. De cada procedimento foi calculada, automaticamente pelo aparelho, a média de medições com menor erro.

O processo de medição foi realizado fora de casa de vegetação. No momento da determinação da taxa fotossintética, foram registrados valores de PPF (fluxo de fótons de radiação fotossinteticamente ativa) que atinge o nível das folhas, junto com

temperatura de folhas. Os valores de PPFD, razão vermelho : vermelho distante (V:VR) e da energia radiante foram registrados em data-loggers, no intervalo de 15 minutos durante 9 dias do experimento, através de sensores LI-QUANTUM, SKY-R:FR e LI-PYR, respectivamente.

3.5.3 Análises Químicas e Estatística

Os procedimentos e análises químicas do solo e do material vegetal, foram os mesmos utilizados no primeiro experimento (sub-ítem 3.3.3).

De forma semelhante as análises estatísticas realizadas seguiram os mesmos procedimentos relatados no sub-ítem 3.3.4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTO 1

Os resultados da análise de variância ($p < 0,10$) referente à biomassa dos diferentes compartimentos estudados de erva-mate no experimento 1, estão apresentados no Anexo 1. Nos Anexos 2, 3, e 4 são apresentados os resultados da análise de variância referentes ao caule, folhas velhas e folhas novas respectivamente, enquanto no Anexo 5 encontram-se os resultados da análise de variância referente às características químicas do solo utilizado.

4.1.1 Parâmetros de Biomassa

A separação da planta em compartimentos permite verificar a alocação dos nutrientes recém absorvidos. Assim, observa-se que a aplicação de nitrogênio influenciou significativamente a produção de folhas novas e o ganho de biomassa do caule, independente da fonte de nitrogênio usada (Tabela 10). O aumento na biomassa de folha nova foi da ordem de 200% para a fonte $N-NH_4$ e 150% para a fonte $N-NO_3$, enquanto para o caule estes aumentos foram de 26 e 20% respectivamente, para as fontes $N-NH_4$ e $N-NO_3$, comparativamente à testemunha sem N.

A biomassa de folhas velhas não foi afetada significativamente pela adição de nitrogênio. Tal fato não causou estranheza, pois, este compartimento era composto por folhas maduras existentes previamente à aplicação dos tratamentos. Some-se a isto o fato das mudas terem sido selecionadas fenotipicamente, visando uma padronização das mesmas, antes do início do experimento (Tabela 10).

De forma semelhante à biomassa de folhas velhas, a biomassa de raiz e total não diferiram estatisticamente entre tratamentos. Na soma dos componentes aéreos, biomassa aérea, o tratamento $N-NH_4$ se destacou diferenciando-se das mudas que não receberam nitrogênio. O tratamento nítrico, embora apresentasse

valor cerca de 25% maior que o tratamento sem nitrogênio, não diferiu estatisticamente do mesmo.

Na relação biomassa radicial e aérea (proporção R/A) houve uma redução significativa de cerca de 20% no tratamento N-NH₄ em relação à Testemunha. No tratamento N-NO₃, essa redução foi de 13%, porém, não significativa (Tabela 10). Tal redução foi decorrente do aumento da biomassa, nas folhas novas, nos tratamentos que receberam algum tipo de adubação nitrogenada. Isto fica mais evidenciado quando se analisa a distribuição proporcional da biomassa nos diferentes compartimentos das plantas (Figura 2).

Enquanto as folhas novas representaram cerca de 16% da biomassa total nos tratamentos que receberam nitrogênio, na testemunha este valor foi de apenas 7%. Some-se a isto que a proporção das raízes variou de 38% em N-NH₄ para 45% na testemunha (Figura 2). Diminuição na proporção R/A também foi observada em mudas de coníferas (Kozlowski *et al.*, 1991) e de *Bétula pendula* (Ericsson, 1995) que receberam altas doses de nitrogênio. A fonte de nitrogênio foi, ainda, o único fator que resultou em mudanças significativas na alocação de biomassa entre as raízes e a parte aérea de plantas de *Bétula alleghaniensis* e de *Pinus strobus*, com N-NO₃ favorecendo a alocação de biomassa nas raízes, relativamente à N-NH₄ (Bauer & Berntson, 2001).

TABELA 10- BIOMASSA (g) E RELAÇÃO RAIZ / BIOMASSA AÉREA DE MUDAS DE ERVA-MATE, NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DA PLANTA, NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.

Compartimento	Tratamentos		
	Testemunha	NH ₄	NO ₃
Folha Madura	1,26a ¹	1,46a	1,20a
Folha Nova	0,32b	0,97a	0,83a
Caule	0,91b	1,15a	1,10a
Biomassa Aérea (A)	2,50b	3,58a	3,13ab
Raiz (R)	1,95a	2,19a	2,14a
Biomassa Total	4,45a	5,77a	5,27a
Taxa R/A	0,78b	0,61a	0,68ab

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - nível de significância das diferenças entre as médias

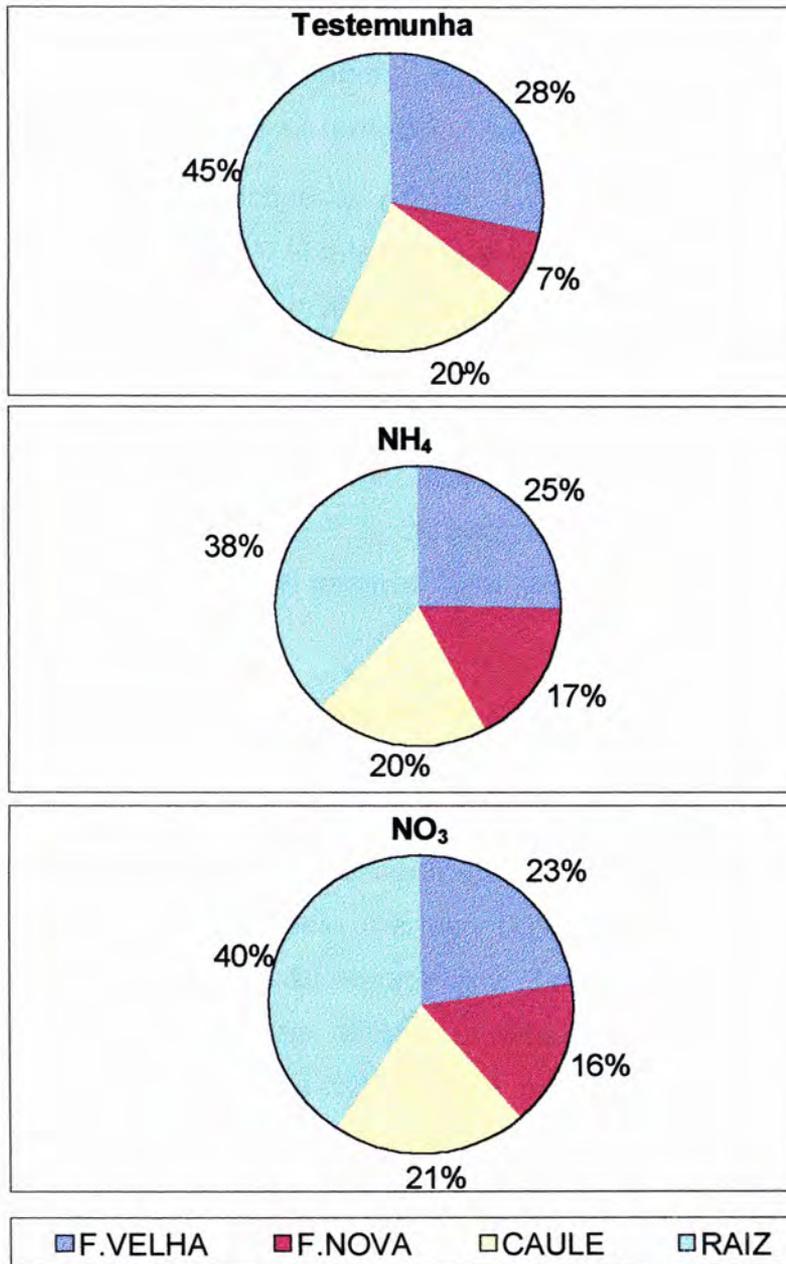


FIGURA 2: DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA NAS MUDAS DE ERVA-MATE, AOS 60 DIAS, EM FUNÇÃO DAS DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO, NO EXPERIMENTO 1.

4.1.2. Composição Química da Biomassa

A distribuição dos nutrientes nos diferentes compartimentos de mudas de erva-mate não foi homogênea. Os elementos N, P, K e Cu apresentaram maior concentração nas folhas novas (Tabela 11). A aplicação dos tratamentos

nitrogenados favoreceu um incremento na concentração de nitrogênio em todos os compartimentos das mudas de erva-mate, comparativamente à testemunha. Não houve, porém, diferença entre as fontes de nitrogênio avaliadas (Tabela 11).

O maior teor de nitrogênio ocorreu nas folhas novas, seguido de folhas velhas e do caule (Tabela 11). O nitrogênio é componente essencial do protoplasma e de enzimas, acumulando-se preferencialmente nas partes aéreas jovens, gemas, sementes e órgãos de armazenamento (Larcher, 2000). Esta ação nas partes jovens das plantas refletiu-se na produção de biomassa na erva-mate. Enquanto o aumento na concentração de nitrogênio ficou em torno de 60% a 50% para as fontes N-NH₄ e N-NO₃, respectivamente (Tabela 11), os ganhos em biomassa foram de cerca de 200% a 160%, respectivamente, para as duas fontes de nitrogênio nas folhas novas (Tabela 10).

Da associação entre os teores de nutrientes e os valores de biomassa, pode-se extrair o conteúdo dos nutrientes nas mudas. O resultado da análise de conteúdo de nutrientes absorvido pode diferir em muito daqueles da análise de teores, assim, este aumento na concentração, associado ao ganho de biomassa resultou em um aumento de pelo menos 100% no conteúdo de nitrogênio nas plantas que receberam fertilização nitrogenada (Tabela 12). Interessante notar ainda que enquanto nas folhas velhas, proporcionalmente, o aumento no conteúdo de nitrogênio variou de 35% em N-NO₃ e 70% em N-NH₄, no caule estes valores chegaram a 100% para ambas as fontes, e nas folhas novas atingiram 270% e 340% de incremento nas fontes N-NO₃ e N-NH₄, respectivamente.

Os teores mais elevados de fósforo nas mudas de erva-mate foram detectados nas folhas novas, para todos os tratamentos. Dentro deste compartimento, porém, não houve diferença entre os três tratamentos. Por outro lado, no compartimento folha velha, a adição de qualquer das fontes nitrogenadas provocou uma redução significativa dos teores de fósforo, em relação à testemunha (Tabela 11). O fósforo é elemento com alta mobilidade dentro da planta, transferindo-se rapidamente de tecidos velhos para as regiões de meristemas ativos (Raij, 1991), podendo ter havido uma migração desse elemento das folhas velhas para as folhas novas para suprir a demanda oriunda da produção de biomassa em resposta ao nitrogênio. Os teores de fósforo no caule não diferiram entre tratamentos (Tabela 11).

Quando se analisam os conteúdos de fósforo nas mudas de erva-mate (Tabela 12), verifica-se que o conteúdo total na fonte N-NH₄ foi superior à testemunha, enquanto a fonte N-NO₃ não diferiu dos demais tratamentos. Observa-se ainda, que no compartimento folhas velhas, os tratamentos nitrogenados mantiveram a tendência observada na análise dos teores (Tabela 11) apresentando conteúdos menores nos tratamentos nitrogenados, relativamente à testemunha. Isto, associado aos conteúdos significativamente superiores das fontes nitrogenadas em relação à testemunha, no compartimento folha nova (Tabela 12), indicam uma migração desse elemento, das partes mais velhas da planta para os compartimentos com maior atividade meristemática. Outro fator que pode estar associado ao aumento no conteúdo desse elemento, nesses tratamentos, é uma maior absorção de fósforo pelos tratamentos que receberam alguma fonte adicional de N, especialmente N-NH₄.

Em revisão sobre o assunto Hinsinger (1998), sugere que a excreção de prótons ocorrendo, especialmente, quando nitrogênio é suprido como amônio pode melhorar a nutrição com fósforo, pela melhora na dissolução de algumas formas de fósforo inorgânico na rizosfera. Gahoonia *et al.* (1992), demonstraram que a mobilização de fósforo no solo pode ser afetada de forma distinta, por diferentes fontes de nitrogênio, dependendo do tipo do solo. Enquanto em um Oxisol, com gramíneas, este favorecimento se deu pela elevação do pH do solo, em 0,6 unidades, pela adição de N-NO₃, em um Ultisol o favorecimento ocorreu pela diminuição do pH, em 1,6 unidades, decorrente da aplicação de N-NH₄. Zhang & Rengel (1999), trabalhando com Di-amônio fosfato (DAP) em trigo, também detectaram um aumento na absorção de fósforo na presença de N-NH₄, e sugeriram que o transporte de fósforo no solo acompanhou o de N-NH₄, destacam, porém, que a distância a que fósforo pode ser transportado varia em função do tipo de solo.

Os teores de potássio nas mudas de erva-mate variaram em função do compartimento da planta. As folhas novas mostraram os maiores teores de potássio enquanto folhas velhas os menores. Isto se explica pela alta mobilidade de potássio dentro da planta, com o elemento se deslocando dos órgãos mais velhos para os mais novos (Mengel & Kirkby, 1982; Malavolta *et al.*, 1997), assim, a exemplo do ocorrido com o fósforo, aparentemente houve uma migração de potássio das folhas velhas para as novas, especialmente, nos tratamentos que receberam alguma fonte

de nitrogênio. Nos dois compartimentos, a Testemunha apresentou teores superiores aos tratamentos nitrogenados (Tabela 11).

Por outro lado, não houve diferença entre tratamentos quando se analisou o conteúdo total de potássio (Tabela 12), embora os tratamentos nitrogenados tenham apresentado valores numéricos superiores à testemunha. As folhas novas, porém, apresentaram, nos tratamentos nitrogenados, conteúdo mais de duas vezes superior aos encontrados na testemunha (Tabela 11). Nas folhas velhas o conteúdo de potássio manteve a tendência mostrada nos teores, com redução nos conteúdos dos tratamentos nitrogenados, relativamente à testemunha (Tabela 12).

O potássio sofre grande competição com vários elementos, como reflexo de uma disputa por cargas negativas dentro de células individuais ou da planta como um todo (Engels & Marschner, 1993). Esta competição parece ser especialmente importante com $N-NH_4$, sendo que os efeitos prejudiciais à absorção, tanto de potássio como de cálcio, são mais comuns quando o pH do meio de crescimento é muito ácido (Pilbeam & Kirkby, 1992). Neste experimento, apesar do pH ($CaCl_2$), estar em torno de 4,8 (Tabela 13), aparentemente a absorção de potássio não foi afetada pela adição da fonte $N-NH_4$, em vista do aumento no conteúdo de potássio, especialmente nas folhas novas, nas mudas que receberam os tratamentos com nitrogênio, relativamente à testemunha.

O cálcio distribuiu-se eqüitativamente entre o caule e as folhas velhas, aparecendo em teores menores nas folhas novas (Tabela 11). O cálcio é considerado elemento de acúmulo e de baixa mobilidade na planta (Mengel & Kirkby, 1982), o que pode explicar este comportamento. O cálcio atua em diversos processos na planta, como regulador de hidratação, ativador de enzimas, regulador de crescimento e como substância sinalizadora (Larcher, 2000), além de ter função estrutural nas plantas, sendo essencial para a manutenção da integridade das membranas e paredes celulares (Malavolta *et al.*, 1997). Os compartimentos caule e folha nova não apresentaram diferenças entre tratamentos quanto aos teores de cálcio em mudas de erva-mate. Todos os tratamentos, porém, diferiram entre si nas folhas velhas (Tabela 11). O tratamento $N-NO_3$ apresentou os maiores teores, seguido de $N-NH_4$ e da testemunha. Quando se considera o conteúdo total de cálcio, a diferença não existe entre os tratamentos nitrogenados, mantendo-se somente entre esses e a testemunha, no compartimento folha nova (Tabela 12).

Os teores mais elevados de magnésio foram registrados no compartimento folha velha, não havendo, porém, diferenças entre os tratamentos (Tabela 11). magnésio é um dos elementos centrais na molécula de clorofila sendo, portanto, elemento chave no processo de fotossíntese (Raij, 1991). Além disso, magnésio é essencial na ativação de um grande número de enzimas, incluindo aquelas requeridas para a síntese de proteínas (Clarkson & Hanson, 1980). Cabe lembrar que apesar da terminologia usada neste trabalho, as chamadas folhas velhas, eram na verdade folhas fisiologicamente ativas, existentes previamente à aplicação dos tratamentos. Os teores de magnésio no caule foram menores no tratamento $N-NO_3$, comparativamente a $N-NH_4$, não diferindo da testemunha. Enquanto os teores nas folhas novas não foram afetados pela adição de nitrogênio, comparativamente à testemunha (Tabela 11). Quando se considera o conteúdo de magnésio na planta percebe-se que os tratamentos nitrogenados favoreceram a absorção de magnésio em todos os compartimentos das mudas de erva-mate, sendo que os maiores conteúdos foram observados nas folhas velhas, fisiologicamente ativas, mas o incremento mais marcante foi observado nas folhas novas, com conteúdos duas a três vezes superiores aos da testemunha (Tabela 12).

Os maiores teores de cobre foram encontrados nas folhas novas, enquanto as folhas velhas apresentaram os menores teores (Tabela 11). Somente os teores do tratamento $N-NH_4$, no compartimento folha velha, foram superiores à testemunha (Tabela 11). Por outro lado, os conteúdos de cobre no tratamento $N-NH_4$, foram superiores em relação à testemunha, em todos os compartimentos e também no total da planta (Tabela 12). Os conteúdos no tratamento $N-NH_4$ diferiram ainda daqueles da fonte $N-NO_3$ nas folhas velhas, enquanto os conteúdos nos compartimentos caule e folha nova, e no total das plantas, na fonte $N-NO_3$, foram superiores à testemunha (Tabela 12). Kumar *et al.* (1990), trabalhando com trigo, detectaram um antagonismo entre cobre e nitrogênio, sendo que na fonte $N-NH_4$ este antagonismo foi maior do que na fonte $N-NO_3$. Neste experimento não foi detectado indício de tal antagonismo, havendo inclusive um incremento na absorção de cobre nas plantas que receberam a fonte $N-NH_4$. O cobre na planta atua principalmente em reações enzimáticas, não sendo estabelecida relação clara do elemento com nitrogênio (Marschner, 1995).

O ferro apresentou os maiores teores no caule, não havendo diferenças entre os tratamentos. Isto de certa forma é inesperado visto que o ferro está envolvido na fotossíntese, na respiração, na assimilação de nitrogênio e enxofre, além de ser constituinte ou ativador de inúmeras enzimas (Malavolta *et al.*, 1997), acumulando-se preferencialmente nas folhas e com baixa mobilidade dentro da planta (Larcher, 2000). No compartimento folhas velhas N-NH₄ apresentou teores superiores à testemunha e a N-NO₃, enquanto nas folhas novas, N-NO₃ apresentou teores superiores aos demais tratamentos (Tabela 11). Na análise do conteúdo de ferro nas mudas de erva-mate (Tabela 12), observa-se que a fonte N-NH₄ favoreceu um incremento no compartimento folha velha, relativamente a testemunha e à fonte N-NO₃, enquanto no compartimento folha nova essa diferença ocorreu somente em relação à testemunha. Os conteúdos totais de ferro não diferiram entre tratamentos.

O teor de manganês foi muito maior no compartimento folha velha do que nos demais, com uma diferença pelo menos 14 vezes superior aos teores do caule e 6 vezes aos das folhas novas (Tabela 11). Teores muito elevados de manganês, variando de 1318 a 2708 mg/kg, em plantas crescendo a campo foram observados por Wisniewski & Curcio (1997), sendo erva-mate considerada espécie acumuladora desse elemento (Wisniewski *et al.*, 1997). À semelhança de magnésio, manganês também está envolvido diretamente, na fotossíntese e na transferência de fosfato, além de atuar na estabilização da estrutura do cloroplasto e na síntese de ácidos nucleicos (Larcher, 2000), sendo, portanto, coerente a existência de teores mais elevados nas áreas fotossinteticamente ativas. Dentro de cada compartimento, os teores não diferiram estatisticamente, entre tratamentos.

Quando se consideram os conteúdos, as diferenças entre os tratamentos, no caule e nas folhas velhas, continua a não existir. Porém, no compartimento folhas novas, o conteúdo de manganês na fonte N-NH₄ foi três vezes superior ao da testemunha e duas vezes superior à fonte N-NO₃, enquanto na fonte N-NO₃ foi o dobro do teor da testemunha (Tabela 12). A concentração de manganês nas plantas pode ser drasticamente alterada por alterações no pH rizosférico. Friedrichsen (1967)², citado por Marschner & Römheld (1996), verificou que a concentração de manganês em plantas aumentava drasticamente se a fonte N-NO₃ era utilizada,

² Friedrichsen, J. (1967) Ursachen von Säureschaden an Kulturpflanzen auf Böden Schleswig-Holsteins. PhD dissertation, Kiel University, Germany.

quando o substrato de cultivo era areia, porém, quando o substrato utilizado era o solo, estas altas concentrações ocorriam quando do uso da fonte N-NH₄. Aquele autor associou estas alterações na concentração de manganês nas plantas, a alterações no pH rizosférico decorrente da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio.

Os maiores teores de zinco foram encontrados no caule das mudas de erva-mate, não havendo diferença entre os tratamentos (Tabela 11). Observa-se, porém, que quando se analisa o conteúdo do elemento, o zinco apresenta-se em quantidades muito semelhantes no caule e no compartimento folhas (folhas velhas + folhas novas) (Tabela 12). No compartimento folhas novas, a adição de qualquer das fontes nitrogenadas favoreceu um aumento significativo do conteúdo de zinco, em relação à testemunha.

O zinco é constituinte de diversas enzimas, atuando ainda na ativação de outras, na formação da clorofila, no metabolismo de carboidratos, na síntese e degradação de proteínas e na biossíntese de reguladores de crescimento, especialmente auxinas (AIA em particular), além de possuir uma função estrutural na manutenção da integridade das membranas (Marschner, 1995; Malavolta *et al.*, 1997), tendo tendência de acúmulo nas raízes e parte aérea (Larcher, 2000). Não existem relações claras entre zinco e diferentes fontes de nitrogênio, embora a deficiência de zinco possa provocar acúmulo de N-NO₃ nas plantas, indicando uma participação no processo de redução do nitrato (Malavolta *et al.*, 1997).

Assim, em uma análise global dos parâmetros de biomassa e nutricionais das mudas de erva-mate, verifica-se que a adição de nitrogênio favoreceu um melhor desenvolvimento geral das plantas, proporcionado um aumento na produção de biomassa nos tratamentos nitrogenados, relativamente à testemunha. Favoreceu, ainda um aumento no conteúdo dos macronutrientes, especialmente no compartimento folhas novas, decorrente da aplicação de fertilizantes nitrogenados nas mudas de erva-mate. Dentre os micronutrientes, somente cobre teve seu conteúdo significativamente favorecido pela adição das fontes de nitrogênio, enquanto ferro, manganês e zinco não diferiram da testemunha.

TABELA 11: TEORES DE MACRO (g.kg^{-1}) E MICRONUTRIENTES (mg.kg^{-1}), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS, EM MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos		
		Testemunha	NH ₄	NO ₃
N	Caule	7,53b ¹	11,98a	11,26a
	Folha Velha	12,00b	18,14a	17,34a
	Folha Nova	22,47b	32,86a	33,05a
P	Caule	0,99a	0,95a	0,89a
	Folha Velha	0,90a	0,53b	0,51b
	Folha Nova	1,84a	1,83a	1,85a
K	Caule	7,38a	6,81a	7,45a
	Folha Velha	5,10a	2,77b	2,75b
	Folha Nova	16,12a	12,81b	14,25ab
Ca	Caule	7,41a	7,52a	7,99a
	Folha Velha	7,32c	7,88b	8,50a
	Folha Nova	4,63a	4,26a	4,12a
Mg	Caule	4,69ab	5,12a	4,67b
	Folha Velha	6,13a	6,75a	7,78a
	Folha Nova	4,93a	4,57a	4,36a
Cu	Caule	6,3a	9,3a	9,0a
	Folha Velha	3,0b	4,0a	3,7ab
	Folha Nova	11,7a	13,0a	11,0a
Fe	Caule	287,7a	195,3a	211,3a
	Folha Velha	132,7b	164,7a	140,0b
	Folha Nova	83,0b	69,0b	102,3a
Mn	Caule	60,3a	52,0a	45,7a
	Folha Velha	846,7a	850,0a	792,3a
	Folha Nova	143,7a	130,3a	102,7a
Zn	Caule	74,3a	70,0a	68,3a
	Folha Velha	42,3a	36,0a	40,0a
	Folha Nova	39,3a	35,7a	38,3a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey

TABELA 12: CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta⁻¹), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS, EM MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos		
		Testemunha	NH ₄	NO ₃
N	Caule	6,84b ¹	13,83a	12,42a
	Folha Velha	15,07b	26,63a	20,76ab
	Folha Nova	7,23b	31,87a	27,05a
	Total	29,15b	72,34a	60,24a
P	Caule	0,90a	1,09a	0,98a
	Folha Velha	1,13b	0,78a	0,61a
	Folha Nova	0,59b	1,78a	1,49a
	Total	2,63b	3,65a	3,08ab
K	Caule	6,72a	7,79a	8,23a
	Folha Velha	6,41b	4,09a	3,21a
	Folha Nova	5,21b	12,45a	11,58a
	Total	18,34a	24,33a	23,02a
Ca	Caule	6,76a	8,68a	8,80a
	Folha Velha	9,25a	11,53a	10,19a
	Folha Nova	1,53b	5,23a	4,46a
	Total	17,53b	25,43a	23,45a
Mg	Caule	4,28b	5,88a	5,15ab
	Folha Velha	7,80a	9,88a	9,26a
	Folha Nova	1,62b	4,42a	3,59a
	Total	13,69b	20,18a	18,00a
Cu	Caule	0,0057b	0,0107a	0,0099a
	Folha Velha	0,0038b	0,0058a	0,0043b
	Folha Nova	0,0037b	0,0126a	0,0091a
	Total	0,0133c	0,0292a	0,0233b
Fe	Caule	0,2589a	0,2251a	0,2303a
	Folha Velha	0,1648b	0,2423a	0,1677b
	Folha Nova	0,0266b	0,0669a	0,0861a
	Total	0,4503a	0,5343a	0,4842a
Mn	Caule	0,0554a	0,0603a	0,0500a
	Folha Velha	1,0705a	1,2523a	0,9634a
	Folha Nova	0,0477c	0,1264a	0,0812b
	Total	1,1736a	1,4391a	1,0946a
Zn	Caule	0,0675a	0,0806a	0,0750a
	Folha Velha	0,0528a	0,0526a	0,0472a
	Folha Nova	0,0127b	0,0346a	0,0308a
	Total	0,1331a	0,1679a	0,1531a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey

4.1.3 Alterações nas Características Químicas do Solo

Os dados referentes à análise química do solo são apresentados na tabela 13. As frações de solo rizosférico e não rizosférico foram analisadas separadamente visando detectar diferenças na dinâmica dos nutrientes nestas duas condições. As variações em pH (CaCl_2), de ambas as frações do solo, decorrentes da adição de diferentes fontes de nitrogênio não diferiram estatisticamente entre si. A reação clássica, em literatura, quando se usam diferentes fontes de nitrogênio, especialmente N-NO_3 e N-NH_4 , é a acidificação do solo, particularmente do rizosférico, com o uso da fonte N-NH_4 e uma elevação do pH com uso de N-NO_3 (Marschner, 1995; Gahoonia *et al.*, 1992). O efeito de diminuição do pH, decorrente da aplicação da fonte amoniacal de nitrogênio, é relacionado a uma maior excreção de H^+ (Marschner & Römheld, 1996), sendo relatado tanto para espécies crescendo em solos ácidos (Gijssman, 1990a), como em solos alcalinos (Tagliavini *et al.*, 1995; Zoysa *et al.*, 1998). Por outro lado, a diminuição na excreção de íons H^+ , e um aumento nas taxas de HCO_3^- ou OH^- é associada ao suprimento de N-NO_3^- , especialmente em combinação com cálcio (Marschner & Römheld, 1996). Dentre os fatores que afetam a extensão das alterações de pH do solo estão o pH inicial e o poder tampão do solo, sendo que este último depende dos teores de argila e de matéria orgânica contida no mesmo, os quais podem neutralizar as mudanças de pH induzidas pelas raízes (Marschner, 1995). A extensão das diferenças em concentração de íons e pH entre as frações rizosférica e não rizosférica do solo é dependente ainda, da espécie vegetal e do incremento em biomassa (Schöttelndreier & Falkengren-Grerup, 1999).

Assim, a não influência das fontes de nitrogênio sobre o pH do solo (Tabela 13), em mudas de erva-mate, pode estar relacionada ao elevado teor de matéria orgânica no solo original ($89,18 \text{ g.dm}^{-3}$ - Tabela 6) ou à composição da solução nutritiva empregada no mesmo. A matéria orgânica do solo, geralmente, confere aos mesmos alta capacidade de tamponamento, aumentando assim a resistência à alterações de pH (Mello *et al.*, 1983). De maneira semelhante, a solução nutritiva utilizada no experimento (Tabela 7) apresentava, nos tratamentos testemunha e na fonte N-NH_4 , carbonato de cálcio (CaCO_3) em sua composição, sendo que CaCO_3 é

um dos principais materiais usados nos processos de calagem para a elevação do pH de solos ácidos (Raij, 1991).

Os níveis de potássio no solo foram praticamente uniformes, tanto entre tratamentos quanto entre as frações do solo (Tabela 13). Deve-se ressaltar que os níveis de potássio observados aqui correspondem a um baixo nível de produtividade de erva-mate, de acordo com o proposto por Sosa (1995). Este autor relacionou altas produtividades de erva-mate a solos com concentrações de potássio superiores a $0,30 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ (Tabela 3).

De forma semelhante, não houve diferença entre tratamentos ou fração de solo não rizosférico e rizosférico quanto ao teor de cálcio. Geralmente, a fonte $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, utilizada neste experimento, favorece uma maior concentração de cálcio nas plantas (Marschner & Römheld, 1996). Entretanto, neste experimento, tanto para a testemunha como para a fonte N- NH_4 foi adicionado CaCO_3 , visando equiparar a quantidade de cálcio recebido pela fonte N- NO_3 .

Os teores de H+Al por sua vez, foram influenciados pelas diferentes fontes de nitrogênio. A fonte N- NH_4 favoreceu um aumento na concentração de H+Al, no solo rizosférico, comparativamente à testemunha e à fonte N- NO_3 e somente em relação à testemunha no solo não rizosférico. Este resultado, aparentemente, foi decorrente de um aumento na excreção de íons H^+ e não pela alteração na concentração de alumínio no solo, como pode ser observado na tabela 13. Como comentado anteriormente, um aumento na excreção de hidrogênio é uma reação típica à fonte N- NH_4 , geralmente responsável por um abaixamento do pH do solo.

Os teores de magnésio no solo foram muito variáveis, o que contribuiu para a não existência de diferenças entre tratamentos, apesar da concentração na fonte N- NH_4 ser cerca de 50% superior à testemunha em ambos as frações de solo e em cerca de 70% no solo rizosférico, em relação a N- NO_3 . Em alguns casos pode haver competição entre NH_4 e magnésio acarretando uma diminuição na disponibilidade de magnésio (Tisdale *et al.*, 1993), porém isto não ocorreu neste experimento, havendo inclusive, um aumento nos teores de magnésio na fonte amoniacal, comparativamente à testemunha. O fato dos teores de magnésio não terem sido inibidos pela fonte N- NH_4 , que apresentou maior concentração de hidrogênio, responsável pela competição com magnésio, pode ser explicado pela alta

disponibilidade de magnésio no solo, visto estarem bem acima dos teores considerados ideais para a obtenção de altas produtividades em erva-mate por Sosa (1995).

O fósforo não teve seus teores afetados pela adição de qualquer das fontes de nitrogênio, independente da fração do solo (Tabela 13). Gahoonia *et al.* (1992) detectaram uma maior absorção de fósforo, em solos ácidos, quando plantas de *Lolium perenne* receberam $N-NO_3$ como fonte de nitrogênio. Aqueles autores concluíram que tal fato ocorreu devido à troca de HCO_3^- por fosfato adsorvido a óxidos de ferro e alumínio. O solo utilizado neste experimento, apesar de apresentar valor de pH bastante ácido, apresentava altos teores de matéria orgânica, sendo que o fósforo costuma estar intimamente ligado à matéria orgânica (Novais & Smyth, 1999), chegando em alguns solos florestais a representar cerca de 95% do fósforo (Zech *et al.*, 1987). Talvez isto explique os elevados teores encontrados em ambas as frações do solo, as quais equivalem aos níveis de fósforo tidos como adequados para a obtenção de altas produtividades de erva-mate, de acordo com a classificação de Sosa (1995).

Os teores de sódio foram muito elevados nas duas frações de solo devido, provavelmente, à adição da solução nutritiva que apresentava altas concentrações do elemento. Não houve diferença entre tratamentos nas duas frações. Entretanto os teores de sódio foram significativamente maiores na fração rizosférica do que na não rizosférica do solo (Figura 3). Tal fato parece estar ligado a uma dinâmica particular do sódio neste meio, visto que este comportamento repetiu-se nos experimentos seguintes. O sódio apresenta ação dispersante sobre a matéria orgânica e sobre a argila, reduzindo os agregados do solo, a permeabilidade ao ar e à água, a germinação, e o crescimento radicial, dependendo do solo (Tisdale *et al.*, 1993), podendo interferir diretamente na absorção de nutrientes pelas plantas.

Em uma avaliação geral, a adubação com diferentes fontes de nitrogênio, não promoveu mudanças significativas nos parâmetros da análise do solo. De maneira geral, o não reflexo, das alterações dos parâmetros ligados a acidez, sobre os teores dos demais elementos, deve estar relacionada à adição de $CaCO_3$ em alguns tratamentos e ao elevado teor de matéria orgânica, que atuou como tampão do solo. Na produção de biomassa e na absorção de nutrientes pelas mudas de

erva-mate, a resposta à adição de nitrogênio foi marcante, embora diferenças entre as fontes não tenham sido significativas.

TABELA 13: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO DE MUDAS DE ERVA-MATE NO EXPERIMENTO 1. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.

Característica do solo	Fração do Solo	Tratamentos		
		Testemunha	NH ₄	NO ₃
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4,87a	4,85a	4,92a
	Rizosférico	4,91a	4,87a	4,95a
K (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	0,11a	0,10a	0,10a
	Rizosférico	0,09a	0,09a	0,10a
Ca (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	6,81a	8,25a	7,14a
	Rizosférico	7,20a	6,89a	6,23a
Ca+Mg (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	9,17a	11,83a	10,41a
	Rizosférico	9,75a	10,58a	8,41a
Al (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	0,42a	0,59a	0,46a
	Rizosférico	0,65a	0,48a	0,38a
H+Al (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	8,16b	9,33a	8,89ab
	Rizosférico	8,25b	9,88a	8,51b
Mg (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	2,36a	3,58a	3,27a
	Rizosférico	2,54a	3,69a	2,18a
H (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	7,74b	8,74a	8,43ab
	Rizosférico	7,60b	9,40a	8,12b
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	77,91a	73,71a	81,39a
	Rizosférico	73,08a	80,27a	91,22a
P (mg/dm ³)	Não rizosférico	9,67a	10,90a	10,93a
	Rizosférico	9,80a	10,07a	10,10a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	129,00a	127,67a	132,33a
	Rizosférico	155,67a	171,33a	168,00a
CTC ³ (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	17,44a	21,26a	19,41a
	Rizosférico	18,10a	20,56a	17,02a
S ² (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	9,28a	11,93a	10,51a
	Rizosférico	9,84a	10,67a	8,50a

¹-valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

²- Soma de bases (K+Ca+Mg);

³- CTC = S + H⁺ + Al³⁺

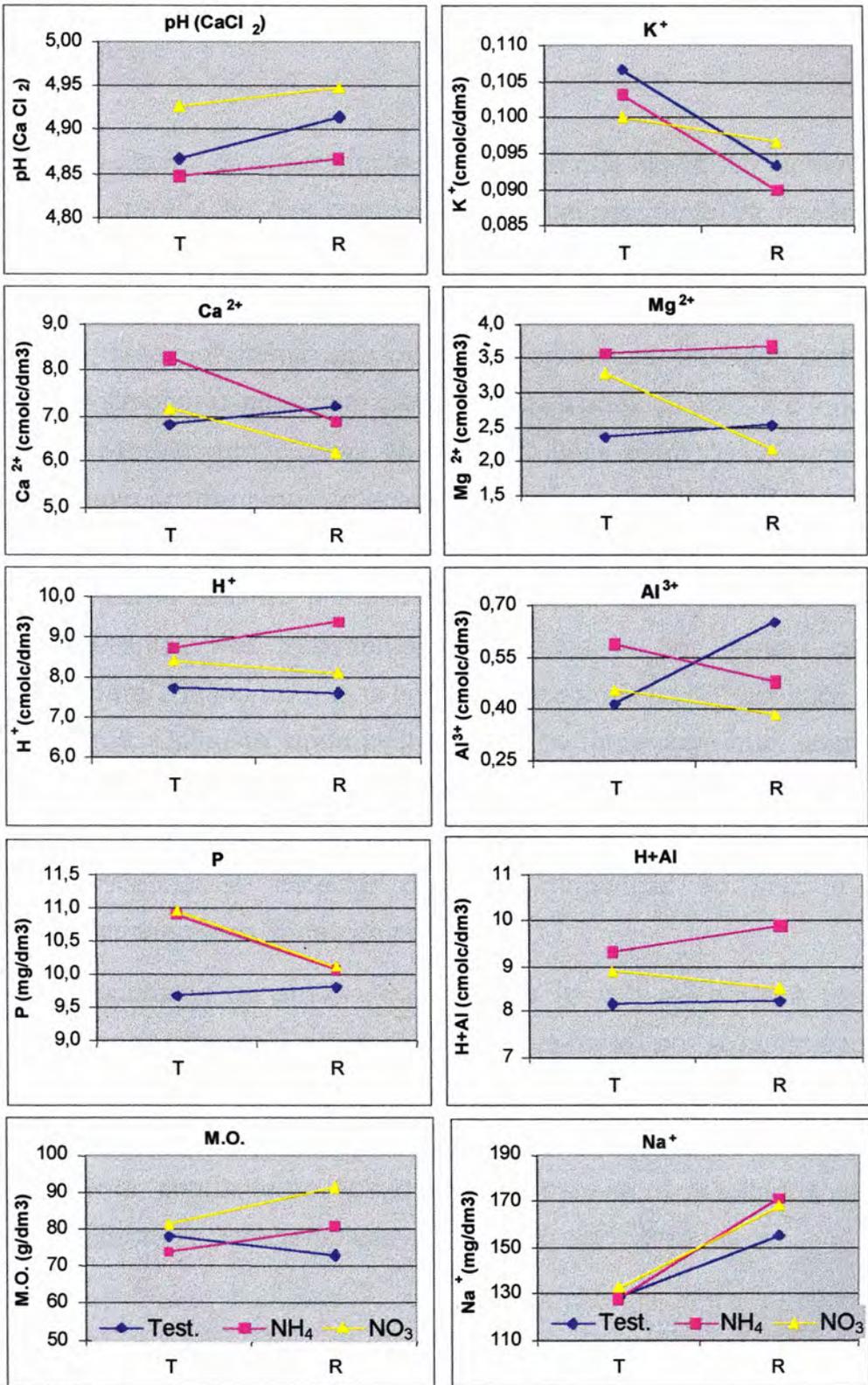


FIGURA 3: DIFERENÇA ENTRE AS FRAÇÕES DE SOLO, NÃO RIZOSFÉRICO (T) E RIZOSFÉRICO (R), NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SOLO, EM MUDAS DE ERVA-MATE COM 60 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 1.

4.2 EXPERIMENTO 2

Os resultados do experimento 1 indicaram que houve um tamponamento do solo, com baixa variação das características químicas, tanto da fração rizosférica como da não rizosférica. Possíveis causas para este fato podem ter sido: o uso da solução nutritiva, que continha, além dos macro-nutrientes em quantidade suficiente para o pleno desenvolvimento das mudas de erva-mate, produtos como o CaCO_3 que são normalmente usados para a correção da acidez do solo; e o longo prazo de condução do experimento, 60 dias, sendo que muitas alterações nas características químicas do solo ocorrem rapidamente após a introdução de variáveis que alterem o equilíbrio previamente estabelecido. Assim, neste segundo experimento, optou-se por usar o mesmo solo do primeiro, aplicando-se, porém, somente os produtos químicos referentes aos tratamentos específicos, e por reduzir o tempo do experimento para 25 dias, com uma coleta intermediária no 10º dia após a aplicação dos tratamentos. Optou-se ainda pela inclusão da fonte uréia que, além de ser um dos fertilizantes nitrogenados mais usados na agricultura, provoca alterações marcantes no solo, quando da sua aplicação (Tisdale *et al.*, 1993). Com estas alterações pretendeu-se detectar possíveis mudanças no solo e na planta provocadas por diferentes fontes de nitrogênio.

Os resultados da análise de variância ($p < 0.10$) referente à biomassa dos diferentes compartimentos estudados de erva-mate no experimento 2, estão apresentados no Anexo 6. Nos Anexos 7, 8, e 9 são apresentados os resultados da análise de variância referentes ao caule, folhas velhas e folhas novas respectivamente, enquanto no Anexo 10 encontram-se os resultados da análise de variância referente às características químicas do solo utilizado.

4.2.1 Parâmetros de Biomassa

A produção de biomassa em mudas de erva-mate não foi afetada pela aplicação de nitrogênio. A evolução da biomassa nos diferentes compartimentos e no total das plantas, entre o 10º e 25º dia, ocorreu de forma equivalente entre os

tratamentos (Tabela 14). Estes resultados diferem daqueles obtidos no Experimento 1 onde variações de até 200% foram obtidos em relação à testemunha. Possíveis causas para isto são: a) o não uso, neste experimento 2, de uma solução nutritiva onde, pelo menos os macronutrientes, estivessem todos presentes, fornecendo condições de pleno desenvolvimento às mudas, a exemplo do ocorrido no primeiro experimento; e b) o curto tempo de crescimento das mudas após a aplicação dos tratamentos, 25 dias, comparativamente a 60 dias no experimento 1, não permitindo que possíveis ganhos na absorção de nutrientes, pelos tratamentos que receberam qualquer das fontes de nitrogênio pudesse se converter em ganho de biomassa. A mudança no tempo de condução do experimento se deu, visando um melhor acompanhamento das alterações iniciais na rizosfera.

As folhas representaram cerca de 50% da biomassa total das mudas (Figura 4). Larcher (2000) destaca que espécies arbóreas podem, nos primeiros anos de vida, concentrar cerca da metade de sua biomassa nas folhas, enquanto em plantas adultas, já formadas, este percentual pode chegar a apenas 1% da biomassa total. Neste experimento, a proporção entre folha madura e folha nova se alterou com o passar do tempo, em função da fonte de nitrogênio aplicada. Na testemunha, enquanto as proporções de folhas novas e raízes sofreram um incremento de 6% e 7%, respectivamente, entre o 10º e 25º dia após a aplicação dos tratamentos, as folhas velhas apresentaram uma redução de 10% e o caule de 3%, relativamente ao total de biomassa produzida, no mesmo período. Por outro lado, os tratamentos que receberam alguma fonte de nitrogênio deslocaram, proporcionalmente, maior esforço na produção de folhas novas. As fontes N-NO₃ e N-NH₄ tiveram um incremento de 10% e 11% respectivamente, neste compartimento, enquanto em folha velha houve uma redução de 13% e 11% para as duas fontes, respectivamente, e as proporções entre raiz e caule permaneceram inalteradas. No tratamento uréia houve um aumento de 5% e 2% nos compartimentos folha nova e raiz, respectivamente, e um decréscimo de 6% nas folhas velhas (Figura 4).

Como a testemunha crescia em condições de menor disponibilidade de nutrientes, devido a não ter recebido nenhum tipo de fertilização, investiu mais na produção de raízes, as quais atuam tanto na exploração do solo, por água e nutrientes, quanto na estrutura de reserva para a planta. Stulen *et al.* (1993) verificaram que a distribuição de matéria seca entre raiz e parte aérea parece não

ser influenciada quando nitrogênio não é limitante, enquanto o crescimento radicial é favorecido quando o nitrogênio é limitante.

Quando se comparam estes dados com os do primeiro experimento (Figura 2), percebe-se uma coerência entre os dados. Os tratamentos nitrogenados apresentaram maior proporção de folhas novas que a Testemunha em ambos os experimentos. A testemunha apresentou a maior proporção de raízes e a fonte N-NH_4 a menor, nos dois experimentos. As mudas de erva-mate apresentaram um aumento na proporção de raízes entre o 10º e o 25º dia, neste segundo experimento, sendo que os valores observados no primeiro experimento, que foi coletado no 60º dia, parecem ser coerentes com os observados neste segundo experimento.

TABELA 14: BIOMASSA (g) E TAXA RAIZ / PARTE AÉREA (R/A), DOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2. VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES, AOS 10 E 25 DIAS APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.

Coleta	Compartimento	Tratamentos			
		Testemunha	NO_3	Uréia	NH_4
10 dias	F. Velha	3,60a ¹	3,76a	3,54a	3,52a
	F. Nova	0,93a	0,71a	1,34a	1,25a
	Caule	1,73a	1,69a	1,78a	1,73a
	Raiz (R)	2,68a	2,60a	2,75a	3,04a
	B. Aérea (A)	6,27a	6,17a	6,66a	6,50a
	Relação R/A	0,44a	0,42a	0,41a	0,48a
	B. Total	8,95a	8,77a	9,41a	9,53a
25 dias	F. Velha	4,43a	4,01a	4,20a	3,64a
	F. Nova	2,33a	2,46a	2,51a	3,04a
	Caule	2,27a	2,61a	2,35a	2,37a
	Raiz (R)	5,11a	4,44a	4,16a	3,91a
	B. Aérea (A)	9,03a	9,08a	9,06a	9,04a
	Relação R/A	0,55a	0,49a	0,45a	0,42a
	B. Total	14,15a	13,53a	13,23a	12,96a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

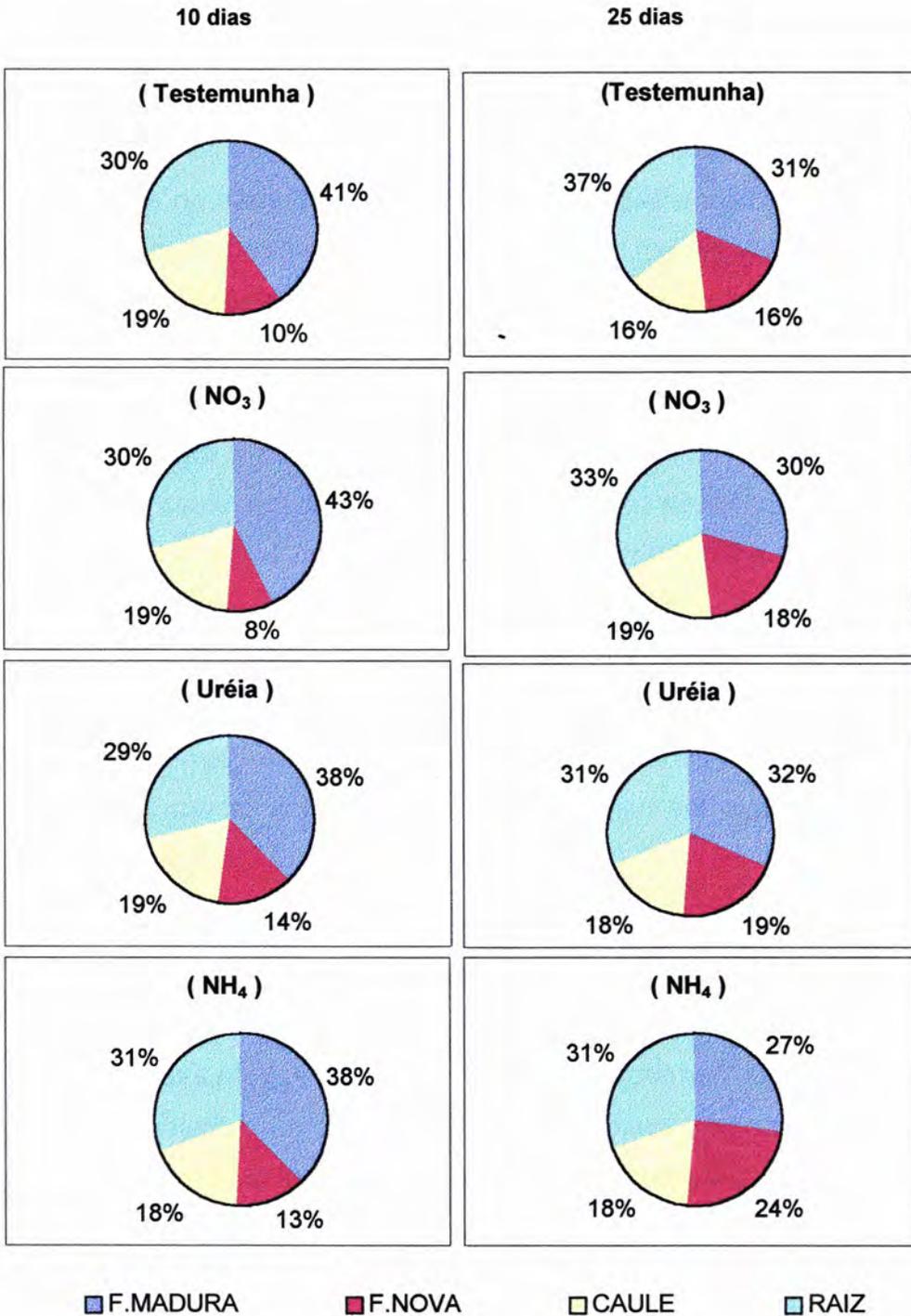


FIGURA 4: ALOCAÇÃO DA BIOMASSA, EM MUDAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLETA E DA FONTE DE NITROGÊNIO APLICADA, NO EXPERIMENTO 2.

4.2.2 Composição Química da Biomassa

Apesar da ausência de reflexo na produção de biomassa, devido à aplicação de diferentes fontes de nitrogênio, foram observadas diferenças em relação aos teores de nutrientes, nos diferentes compartimentos das mudas, em função da fonte de nitrogênio usada (Tabelas 15 e 16). O nitrogênio concentrou-se preferencialmente nas folhas novas de erva-mate, com teores no mínimo duas vezes superiores aos encontradas nas folhas velhas ou no caule, independentes do tratamento: Na primeira observação, aos 10 dias, os teores de nitrogênio só foram superiores na fonte N-NH₄, no caule, em relação à testemunha, não havendo diferença significativa entre os tratamentos nos compartimentos folha velha e folha nova (Tabela 15). Na segunda observação, aos 25 dias, tanto N-NH₄ como uréia foram superiores à testemunha, no caule, sendo que os teores da fonte uréia, foram superiores, ainda, em relação à testemunha nas folhas novas (Tabela 16). Dentro de cada tratamento não houve diferença, entre o 10º e o 25º dia após aplicação das fontes de nitrogênio, nem quanto aos teores (Tabela 17), nem em relação aos conteúdos de nitrogênio (Tabela 20).

Estes resultados diferem dos obtidos no primeiro experimento (Tabela 11), onde a aplicação de diferentes fontes de nitrogênio provocou um forte favorecimento na absorção de nitrogênio. Possíveis razões para isto podem ser: a) o curto período de crescimento das mudas após a aplicação dos tratamentos, comparativamente ao primeiro experimento; b) a deficiência de outros nutrientes, devido a não incorporação de uma solução nutritiva completa às mudas, o que teria prejudicado um desenvolvimento global das mudas; e c) a época em que foi conduzido o experimento. Este segundo experimento foi instalado em final de março, no início do outono, época em que, no campo, as plantas de erva-mate reduzem seu crescimento e iniciam sua preparação para o inverno. Reissmann *et al.* (1985) verificou um decréscimo na concentração dos elementos móveis na planta (N, P e K) durante o outono e o inverno, enquanto Galvão (1986) detectou um máximo de fotossíntese líquida no período de outubro a fevereiro, que coincide com a época de maior crescimento vegetativo das plantas.

O fósforo por sua vez, se concentrou principalmente nas folhas velhas, não diferindo entre tratamentos ou época de avaliação (Tabelas 15, 16 e 17). Este comportamento difere do observado no primeiro experimento (Tabela 11), onde os maiores teores foram observados nas folhas novas. Parte da explicação para uma maior concentração nas folhas novas, no primeiro experimento, foi a alta mobilidade do nutriente na planta e sua preferência por sítios de alta atividade meristemática (Raij, 1991). Como destacado acima, o primeiro experimento foi conduzido durante a primavera-verão, enquanto as mudas do segundo cresceram durante o outono. Erva-mate apresenta brotação intensa de folhas jovens na primavera (Reissmann *et al.*, 1985) e o período de maior resposta anual de fotossíntese líquida da espécie, no campo, ocorre de outubro a fevereiro (Galvão, 1986). Chama a atenção também, os teores do elemento que neste experimento são muito superiores aos encontrados no primeiro. Pode estar ocorrendo um efeito sazonal e as mudas estarem usando as folhas velhas para armazenar o nutriente até a época de emissão de novas folhas, quando então ocorreria a transferência para as regiões meristemáticas da planta, embora a campo, os menores teores de fósforo em folhas e ramos finos, tenham sido observados durante o outono-inverno (Reissmann, *et al.*, 1985).

O potássio apresentou distribuição homogênea entre os compartimentos folha velha e folha nova, e uma concentração um pouco menor no caule, porém, os teores não diferiram entre tratamentos ou época de avaliação (Tabelas 15, 16 e 17). A exemplo do ocorrido com o fósforo, chama a atenção os elevados teores de potássio nas folhas velhas, comparativamente ao primeiro experimento, onde os teores de potássio nas folhas novas eram praticamente o dobro daqueles encontrados nas folhas velhas (Tabela 11). O potássio também é um elemento móvel na planta (Raij, 1991), portanto, a questão da sazonalidade apresentada para explicar os maiores teores de fósforo nas folhas velhas parece aplicar-se também ao potássio. Lourenço *et al.* (1997b), testando diferentes doses de potássio sobre a produção de erva-mate ao longo de três anos, concluíram que houve uma tendência de aumento da produtividade em função da adição de potássio, sem contudo constituir diferença estatística entre os tratamentos.

O cálcio sofreu influência significativa da fonte de nitrogênio aplicada, sendo que a fonte nítrica apresentou teores de cálcio superiores a todos os demais tratamentos, tanto aos 10 dias como aos 25 dias após o início do experimento, nas

folhas velhas e novas. Não houve diferenças entre tratamentos no caule. O fato da fonte de nitrogênio utilizada no tratamento nítrico ter sido o $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ parece ter sido a principal causa desse aumento na absorção de cálcio. De maneira diferente do primeiro experimento desse trabalho, não foi adicionada nenhuma outra fonte de cálcio aos demais tratamentos, assim, a maior disponibilidade de cálcio proporcionada pela adição de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ favoreceu esse acúmulo que ocorreu de forma equilibrada entre os compartimentos das mudas que receberam a fonte N-NO_3^- (Tabelas 15 e 16). Some-se a isto, o fato da fonte N-NO_3^- estimular a síntese de anions orgânicos, o que resulta em acúmulo de cátions, especialmente o cálcio resultando em um aumento na absorção desse elemento (Tisdale *et al.*, 1993).

Mudas de erva-mate apresentaram maiores teores de magnésio nas folhas velhas, mas não diferiram entre tratamentos ou época de coleta das mudas (Tabelas 15, 16 e 17). Estes dados são reforçados quando se consideram os conteúdos de magnésio nas mudas (Tabelas 18 e 19), os quais se apresentam, nas folhas velhas, cerca de quatro vezes superior aos das folhas novas e três vezes superior aos do caule, aos 10 dias, sendo que aos 25 dias nas folhas novas esta diferença cai para o dobro e permanece a mesma em relação ao caule. Uma tendência a uma maior concentração nas folhas do que no caule também foi observada por Reissmann *et al.* (1985) em plantas crescendo a campo. Wisniewski *et al.* (1997) observou um antagonismo entre potássio e magnésio em mudas crescendo a campo. Comparando-se os resultados deste experimento com os valores de produtividade propostos por Sosa (1995), verifica-se que os dados aqui obtidos para potássio se enquadram na faixa de baixa produtividade da erva-mate, enquanto os de magnésio se situam na faixa de alta produtividade, caracterizando o antagonismo observado por Wisniewski *et al.* (1997).

Os teores de cobre não diferiram entre tratamentos nos diferentes compartimentos (Tabelas 15 e 16). Interessante notar que cobre não se concentrou preferencialmente em um compartimento das mudas, alternando maiores teores e conteúdos de acordo com a fonte de nitrogênio aplicada (Tabelas 16 e 19). A aplicação de nitrogênio pode afetar a disponibilidade e mobilidade de cobre, através do seqüestro de grande quantidade do elemento complexado a aminoácidos e proteínas em tecidos maduros, ou pelo decréscimo na taxa de translocação de cobre das folhas velhas para áreas de novo crescimento (Marschner, 1995).

O ferro apresentou altos teores em todos os compartimentos das mudas de erva-mate, independente da época de coleta e do tratamento aplicado (Tabelas 15 e 16). Os valores encontrados estão muito acima dos obtidos por Zampier (2001), trabalhando com fertilização mineral e orgânica, mas estão nos mesmos patamares observados no primeiro experimento deste trabalho, o que indica que a genética da planta determinou o montante de ferro absorvido. Na segunda coleta aos 25 dias, os teores observados nas fontes N-NO₃ e uréia, no compartimento folhas velhas, apresentaram uma diminuição significativa em relação à testemunha (Tabela 16). Os conteúdos de ferro no compartimento folhas velhas, aos 25 dias, nos tratamentos que receberam quaisquer das fontes de nitrogênio, foram aproximadamente metade daqueles observados na testemunha. A diferença, porém, não foi significativa (Tabela 19). A absorção de ferro pode ser influenciada por outros cátions como o potássio, cálcio e magnésio (Malavolta *et al.*, 1997), mas não existe relação clara com nitrogênio.

Os teores de manganês foram muito mais elevados nas folhas velhas do que nos demais compartimentos (Tabelas 15 e 16). Apesar disso, os valores observados estão muito abaixo dos encontrados no primeiro experimento (Tabela 11) e dos relatados por Wisniewski *et al.* (1997) para plantas jovens em campo. A absorção de manganês pode ser inibida por alguns metais alcalinos-terrosos, como o cálcio e o magnésio, em especial o magnésio (Malavolta *et al.*, 1997). Os teores de magnésio neste experimento encontram-se bastante elevados, conforme discutido acima, o que pode estar acarretando uma competição com manganês e provocando a ocorrência dos baixos teores.

Zinco por sua vez apresentou resultados muito semelhantes aos do primeiro experimento, com os maiores teores ocorrendo no caule das mudas de erva-mate, não diferindo entre tratamentos ou épocas de coleta (Tabelas 15, 16 e 17).

TABELA 15: COMPARAÇÃO DO TEOR DE NUTRIENTES, ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos			
		Testemunha	NO ₃	Uréia	NH ₄
N	Caule	9,96b	12,15ab	12,37ab	14,47a
	Folha Velha	13,44a	15,33a	15,27a	16,26a
	Folha Nova	32,23a	38,47a	35,63a	37,58a
P	Caule	2,57a	2,53a	2,28a	2,46a
	Folha Velha	5,26a	3,90a	4,60a	5,20a
	Folha Nova	2,35a	2,30a	2,17a	1,99a
K	Caule	10,14a	11,25a	9,51a	8,82a
	Folha Velha	14,91a	14,46a	12,57a	12,68a
	Folha Nova	15,35a	14,23a	14,91a	13,91a
Ca	Caule	7,92a	9,26a	7,13a	7,83a
	Folha Velha	5,76b	7,45a	6,26b	6,81ab
	Folha Nova	4,05b	6,10a	4,18b	4,33b
Mg	Caule	4,46a	4,53a	4,10a	4,63a
	Folha Velha	6,57a	7,42a	6,62a	7,51a
	Folha Nova	4,87a	4,76a	4,84a	4,86a
Cu	Caule	17,33a	9,66a	11,00a	22,00a
	Folha Velha	8,33a	5,33a	6,00a	16,33a
	Folha Nova	18,33b	18,67b	13,00b	33,00a
Fe	Caule	215,a	171a	173a	235a
	Folha Velha	134a	156a	152a	147a
	Folha Nova	205a	151a	164a	159a
Mn	Caule	21,67ab	20,33ab	18,67b	28,67a
	Folha Velha	328,00a	317,70a	356,00a	393,30a
	Folha Nova	60,70a	59,70a	68,30a	56,00a
Zn	Caule	94,67a	106,33a	81,33a	97,66a
	Folha Velha	39,67a	44,67a	41,00a	40,67a
	Folha Nova	45,00a	46,30a	37,30a	47,00a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - para N, P, K, Ca e Mg a unidade de medida é g/kg e para Cu, Fe, Mn e Zn mg/kg.

TABELA 16: COMPARAÇÃO DO TEOR DE NUTRIENTES, ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos			
		Testemunha	NO ₃	Uréia	NH ₄
N	Caule	9,67b	13,43ab	15,89a	16,87a
	Folha Velha	12,90a	16,92a	16,31a	17,43a
	Folha Nova	26,77b	35,31ab	38,73a	30,50ab
P	Caule	2,14a	2,28a	2,27a	2,12a
	Folha Velha	4,93a	4,21a	4,37a	4,95a
	Folha Nova	1,90a	2,23a	2,27a	1,99a
K	Caule	8,74a	8,33a	8,13a	6,53a
	Folha Velha	12,01a	12,74a	12,29a	12,57a
	Folha Nova	13,30a	14,45a	11,81a	11,16a
Ca	Caule	7,91a	9,42a	7,78a	7,24a
	Folha Velha	6,96b	8,32a	6,11b	6,39b
	Folha Nova	5,22b	7,11a	4,52b	5,11b
Mg	Caule	4,52a	4,18a	4,35a	4,70a
	Folha Velha	7,41a	7,19a	6,43a	6,97a
	Folha Nova	5,64a	5,28a	5,14a	5,55a
Cu	Caule	13,33a	5,33a	7,67a	7,00a
	Folha Velha	4,33a	6,67a	4,00a	5,33a
	Folha Nova	8,00a	8,67a	9,33a	5,66a
Fe	Caule	184a	159a	146a	125a
	Folha Velha	207a	116b	97b	132ab
	Folha Nova	99a	127a	85a	96a
Mn	Caule	20,67a	20,00a	21,00a	27,67a
	Folha Velha	326,00a	327,70a	228,00a	219,00a
	Folha Nova	66,70a	101,70a	86,70a	90,00a
Zn	Caule	86,67a	83,67a	47,67a	86,00a
	Folha Velha	53,00a	30,67a	36,67a	34,00a
	Folha Nova	33,30a	36,00a	31,70a	34,70a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - para N, P, K, Ca e Mg a unidade de medida é g/kg e para Cu, Fe, Mn e Zn mg/kg.

TABELA 17: TEOR DE NUTRIENTES, EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (10 OU 25 DIAS), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Tratamento	Caule		F.Velha		F.Nova	
		10	25	10	25	10	25
N	Testemunha	9,96a	9,67a	13,40a	12,99a	32,23a	26,77a
	NO ₃	12,15a	13,43a	15,33a	16,92a	38,47a	35,31a
	Uréia	12,37a	15,89a	15,27a	16,31a	35,63a	38,73a
	NH ₄	14,47a	16,87a	16,26a	17,43a	37,58a	30,51a
P	Testemunha	2,57a	2,14a	5,26a	4,93a	2,53a	1,90a
	NO ₃	2,53a	2,28a	3,91a	4,22a	2,30a	2,23a
	Uréia	2,28a	2,27a	4,60a	4,37a	2,18a	2,27a
	NH ₄	2,46a	2,12a	5,20a	4,95a	1,97a	1,99a
K	Testemunha	9,79a	9,13a	12,35a	11,83a	15,23a	13,97a
	NO ₃	9,96a	10,18a	14,41a	13,31a	13,64a	15,34a
	Uréia	8,47a	8,35a	11,99a	12,65a	14,35a	11,82a
	NH ₄	9,30a	6,87a	12,98a	12,82a	13,53a	11,88a
Ca	Testemunha	7,92a	7,91a	5,76b	6,96a	4,06a	5,22a
	NO ₃	9,26a	9,43a	7,45a	8,32a	6,10a	7,12a
	Uréia	7,13a	7,78a	6,26a	6,11a	4,18a	4,52a
	NH ₄	7,84a	7,24a	6,81a	6,39a	4,33a	5,11a
Mg	Testemunha	4,46a	4,52a	6,57a	7,41a	4,87a	5,64a
	NO ₃	4,53a	4,18a	7,42a	7,19a	4,76a	5,29a
	Uréia	4,10a	4,35a	6,12a	6,43a	4,84a	5,14a
	NH ₄	4,63a	4,70a	7,51a	6,97a	4,86a	5,55a
Cu	Testemunha	17,33a	13,33a	8,33a	4,33a	18,33a	8,00a
	NO ₃	9,67a	5,33a	5,33a	6,67a	18,67a	8,67a
	Uréia	11,00a	7,67a	6,00a	4,00a	13,00a	9,33a
	NH ₄	22,00a	7,00a	16,33a	5,33a	33,00a	5,67a
Fe	Testemunha	215a	184a	134a	207a	205a	99a
	NO ₃	171a	159a	156a	117a	151a	127a
	Uréia	173a	146a	152a	97a	164a	85a
	NH ₄	235a	125a	147a	133a	159a	96a
Mn	Testemunha	21,67a	20,67a	328a	327a	60,67a	66,67a
	NO ₃	20,33a	20,00a	318a	328a	59,67a	101,67a
	Uréia	18,67a	21,00a	356a	228a	68,33a	86,67a
	NH ₄	28,67a	27,67a	393a	219a	56,00a	90,00a
Zn	Testemunha	94,67a	87,67a	39,67a	53,00a	45,00a	33,33a
	NO ₃	106,33a	83,67a	44,67a	30,67a	46,33a	36,00a
	Uréia	81,33a	47,67a	41,00a	36,67a	37,33a	31,67a
	NH ₄	97,66a	86,00a	40,67a	34,00a	47,00a	34,67a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha e de cada compartimento, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - para N, P, K, Ca e Mg a unidade de medida é g/kg e para Cu, Fe, Mn e Zn a unidade é mg/kg

TABELA 18: COMPARAÇÃO DO CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta^{-1}), ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos			
		Testemunha	NO_3	Uréia	NH_4
N	Caule	2,40a	2,99a	3,01a	3,59a
	Folha Velha	6,63a	7,72a	7,43a	8,09a
	Folha Nova	4,29a	4,82a	6,67a	6,56a
P	Caule	0,61a	0,58a	0,56a	0,56a
	Folha Velha	2,55a	2,03a	2,48a	2,60a
	Folha Nova	0,30a	0,28a	0,41a	0,32a
K	Caule	2,42a	2,65a	2,38a	2,09a
	Folha Velha	7,40a	7,22a	6,17a	6,52a
	Folha Nova	1,98a	1,77a	2,76a	2,41a
Ca	Caule	2,00a	2,23a	1,77a	1,88a
	Folha Velha	2,92a	3,75a	3,13a	3,46a
	Folha Nova	0,53a	0,78a	0,79a	0,76a
Mg	Caule	1,10a	1,09a	1,02a	1,12a
	Folha Velha	3,37a	3,70a	3,32a	3,80a
	Folha Nova	0,67a	0,60a	0,92a	0,88a
Cu	Caule	0,0045a	0,0021a	0,0026a	0,0053a
	Folha Velha	0,0043a	0,0028a	0,0031a	0,0055a
	Folha Nova	0,0023b	0,0024b	0,0023b	0,0053a
Fe	Caule	0,055a	0,041a	0,043a	0,050a
	Folha Velha	0,067a	0,078a	0,078a	0,074a
	Folha Nova	0,025a	0,019a	0,032a	0,031a
Mn	Caule	0,0053a	0,0048a	0,0046a	0,0067a
	Folha Velha	0,1613a	0,1709a	0,1878a	0,2080a
	Folha Nova	0,0072a	0,0075a	0,0132a	0,0097a
Zn	Caule	0,022a	0,025a	0,020a	0,022a
	Folha Velha	0,019a	0,022a	0,020a	0,019a
	Folha Nova	0,006a	0,006a	0,007a	0,008a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

TABELA 19: COMPARAÇÃO DO CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta^{-1}), ENTRE TRATAMENTOS, NOS COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartmento	Tratamentos			
		Testemunha	NO_3	Uréia	NH_4
N	Caule	3,16a	5,06a	5,14a	5,67a
	Folha Velha	8,11a	10,23a	10,11a	9,78a
	Folha Nova	8,61a	10,61a	12,21a	10,56a
P	Caule	0,69a	0,81a	0,73a	0,66a
	Folha Velha	3,07a	2,55a	2,53a	2,87a
	Folha Nova	0,63a	0,71a	0,84a	0,74a
K	Caule	2,74a	3,00a	2,57a	2,15a
	Folha Velha	7,48a	7,57a	7,30a	7,16a
	Folha Nova	4,15a	4,25a	3,91a	3,88a
Ca	Caule	2,49a	3,52a	2,64a	2,34a
	Folha Velha	4,36a	5,03a	3,76a	3,68a
	Folha Nova	1,79	2,29a	1,62a	1,90a
Mg	Caule	1,45a	1,57a	1,47a	1,57a
	Folha Velha	4,61a	4,24a	3,89a	4,03a
	Folha Nova	1,90a	1,72a	1,82a	2,14a
Cu	Caule	0,0042a	0,0019a	0,0025a	0,0020a
	Folha Velha	0,0026a	0,0031a	0,0024a	0,0029a
	Folha Nova	0,0026a	0,0023a	0,0032a	0,0019a
Fe	Caule	0,054a	0,053a	0,047a	0,039a
	Folha Velha	0,134a	0,067a	0,060a	0,076a
	Folha Nova	0,037a	0,035a	0,029a	0,036a
Mn	Caule	0,0064a	0,0074a	0,0071a	0,0092a
	Folha Velha	0,198a	0,188a	0,144a	0,132a
	Folha Nova	0,025a	0,035a	0,035a	0,033a
Zn	Caule	0,027a	0,028a	0,017a	0,026a
	Folha Velha	0,032a	0,015a	0,021a	0,019a
	Folha Nova	0,011a	0,011a	0,010aa	0,012a

- valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey

TABELA 20 : CONTEÚDO DE NUTRIENTES (mg.planta⁻¹), EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (10 OU 25 DIAS), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Tratamento	Caule		F.Velha		F.Nova	
		10	25	10	25	10	25
N	Testemunha	2,40a	3,16a	6,63a	8,11a	4,29a	8,61a
	NO ₃	2,99a	5,06a	7,72a	10,23a	4,82a	10,61a
	Uréia	3,01a	5,14a	7,43a	10,11a	6,67a	12,21a
	NH ₄	3,59a	5,67a	8,09a	9,78a	6,56a	10,56a
P	Testemunha	0,61a	0,69a	2,55a	3,07a	0,30a	0,63a
	NO ₃	0,58a	0,81a	2,03a	2,55a	0,28a	0,71a
	Uréia	0,56a	0,73a	2,48a	2,53a	0,41a	0,84a
	NH ₄	0,56a	0,66a	2,60a	2,87a	0,32a	0,74a
K	Testemunha	2,42a	2,74a	7,40a	7,48a	1,98a	4,15a
	NO ₃	2,65a	3,00a	7,22a	7,57a	1,77a	4,25a
	Uréia	2,38a	2,57a	6,17a	7,30a	2,76a	3,91a
	NH ₄	2,09a	2,15a	6,52a	7,16a	2,41a	3,88a
Ca	Testemunha	2,00a	2,49a	2,92a	4,36a	0,53a	1,79a
	NO ₃	2,23a	3,52a	3,75a	5,03a	0,78a	2,29a
	Uréia	1,77a	2,64a	3,13a	3,76a	0,79a	1,62a
	NH ₄	1,88a	2,34a	3,46a	3,68a	0,76a	1,90a
Mg	Testemunha	1,10a	1,45a	3,37a	4,61a	0,67a	1,90a
	NO ₃	1,09a	1,57a	3,70a	4,24a	0,60a	1,72a
	Uréia	1,02a	1,47a	3,32a	3,89a	0,92a	1,82a
	NH ₄	1,12a	1,57a	3,80a	4,03a	0,88a	2,14a
Cu	Testemunha	0,0045a	0,0042a	0,0043a	0,0026a	0,0023a	0,0026a
	NO ₃	0,0021a	0,0019a	0,0028a	0,0031a	0,0024a	0,0023a
	Uréia	0,0026a	0,0025a	0,0031a	0,0024a	0,0023a	0,0032a
	NH ₄	0,0053a	0,0020a	0,0055a	0,0029a	0,0053a	0,0019a
Fe	Testemunha	0,055a	0,054a	0,067a	0,134a	0,025a	0,037a
	NO ₃	0,041a	0,053a	0,078a	0,067a	0,019a	0,035a
	Uréia	0,043a	0,047a	0,078a	0,060a	0,032a	0,029a
	NH ₄	0,050a	0,039a	0,074a	0,076a	0,031a	0,036a
Mn	Testemunha	0,0053a	0,0064a	0,1613a	0,198a	0,0072a	0,025a
	NO ₃	0,0048a	0,0074a	0,1709a	0,188a	0,0075a	0,035a
	Uréia	0,0046a	0,0071a	0,1878a	0,144a	0,0132a	0,035a
	NH ₄	0,0067a	0,0092a	0,2080a	0,133a	0,0097a	0,033a
Zn	Testemunha	0,022a	0,027a	0,019b	0,032a	0,006a	0,011a
	NO ₃	0,025a	0,028a	0,022a	0,015a	0,006a	0,011a
	Uréia	0,020a	0,017a	0,020a	0,021a	0,007a	0,010a
	NH ₄	0,022a	0,026a	0,019a	0,019a	0,008a	0,012a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha e de cada compartimento, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

4.2.3 Alterações nas Características Químicas do Solo

Os dados dos diversos parâmetros que compõe as características químicas do solo, apresentados nas Tabelas 21 e 22, evidenciam o comportamento distinto das duas frações, não rizosférica e rizosférica, do solo, em função da aplicação das diferentes fontes de nitrogênio. Os valores de pH (CaCl_2) de ambas as frações do solo não diferiram entre si nos tratamentos testemunha, N- NO_3 e N- NH_4 . No tratamento uréia, porém, houve uma elevação do pH inicial, aos 10 dias, no solo rizosférico, em relação à fração não rizosférica. Esta diferença entre as duas frações do solo não se manteve na segunda avaliação, aos 25 dias. A uréia tem como característica provocar uma elevação inicial do pH, devido à hidrólise que sofre quando entra em contato com a solução do solo, gerando NH_4 ou NH_3 dependendo do pH inicial (Tisdale *et al.*, 1993). Porém, este aumento de pH é temporário (Wickramasinghe *et al.*, 1985). Gregory & Hinsinger (1999) destacam que quando nitrogênio é absorvido a partir de uréia, o excesso líquido de cátions é absorvido e embora uma quantidade menor de H^+ seja exportado, comparado com a nutrição de amônio, o pH do solo rizosférico geralmente diminui. Os tratamentos não apresentaram diferenças significativa entre si, independente da época de avaliação (Tabelas 23 e 24). Apesar disso, chama a atenção o fato do pH do solo rizosférico apresentar uma tendência a ser mais elevado que o da fração não rizosférica, independente da fonte de N aplicada (Figura 5). Especialmente a fonte N- NH_4 , costuma provocar uma diminuição do pH na rizosfera (Nye, 1981; Gahoonia *et al.*, 1992; Marschner, 1995), porém, os elevados teores de matéria orgânica (Tabelas 21 e 22) podem ter contribuído para um tamponamento da solução.

Os teores de potássio não diferiram entre as duas frações de solo, nem entre tratamentos ou época de avaliação (Tabelas 21 a 24 e Figura 5). Esses resultados confirmam os obtidos no primeiro experimento, onde, também, não foram observadas diferenças ente tratamentos ou fração do solo.

Somente a fração rizosférica do solo, no tratamento N- NH_4 , na avaliação aos 25 dias, apresentou aumento significativo nos teores de cálcio em relação à fração não rizosférica (Tabela 22). Não houve diferença entre as frações de solo, para nenhum dos tratamentos, na avaliação do 10º dia ou nos demais tratamentos no 25º dia (Tabelas 21 e 22), apesar dos teores de cálcio terem sido sempre mais elevados

no solo rizosférico (Figura 5). Diferenças significativas entre tratamentos só foram observadas na segunda avaliação, onde a fonte N-NH₄ diferiu estatisticamente da testemunha, na fração rizosférica do solo (Tabelas 23 e 24). No primeiro experimento, a inexistência de diferenças entre tratamentos ou entre as duas frações de solo, foi relacionada à adição de solução nutritiva contendo cálcio em quantidades suficientes para o pleno desenvolvimento das mudas. Neste segundo experimento, somente o tratamento nítrico recebeu Ca(NO₃), tendo assim uma quantidade adicional de cálcio que não foi fornecida aos demais tratamentos. Esse fato, porém, não se reverteu em benefício extra para o mesmo. O solo original usado no experimento (Tabela 8) apresentava teores de cálcio no limite superior da faixa dos níveis considerados adequados para uma alta produtividade da erva-mate (Tabela 1).

O magnésio por sua vez concentrou-se preferencialmente na fração rizosférica do solo, com teores de 3 a 5 vezes superiores aos encontrados na fração não rizosférica, especialmente nos tratamentos nitrogenados, independente da época de avaliação (Tabelas 21 e 22, Figura 5). Os teores de magnésio diferiram entre tratamentos, com concentração cerca de 2,5 vezes superior, somente na fração rizosférica dos tratamentos nitrogenados em relação à testemunha (Tabelas 23 e 24). Os resultados do primeiro experimento não mostram a mesma tendência, havendo inclusive um decréscimo acentuado do teor de magnésio na fração rizosférica, na fonte N-NO₃ (Tabela 13; Figura 3). Majdi & Persson (1995) trabalhando com sulfato de amônio, em *Picea abies*, também, detectaram aumento significativo na concentração de magnésio na rizosfera e associaram este aumento à tese de que a absorção de amônio compete de maneira intensa com a absorção de cátions, especialmente o magnésio, podendo inclusive provocar um efluxo deste elemento das raízes.

Em função dos dados apresentados acima, referentes a cálcio e magnésio, os teores de Ca+Mg seguiram uma tendência muito similar à apresentada pelos dois elementos individualmente, com teores mais elevados na fração rizosférica do solo, nos tratamentos nitrogenados, enquanto a testemunha não apresentou diferença estatística entre as duas frações, independente da época de avaliação (Tabelas 21 e 22; Figura 5). Os teores de Ca+Mg não diferiram entre tratamentos na fração não rizosférica, nas duas avaliações. Na fração rizosférica do solo houve um aumento

nos teores de Ca+Mg nos tratamentos que receberam alguma das fontes de nitrogênio, em relação à testemunha (Tabelas 23 e 24).

Alumínio apresentou teores mais baixos na fração rizosférica, em todos os tratamentos, embora somente na fonte N-NO₃ a diferença tenha sido significativa, em relação à fração não rizosférica, em ambas as coletas (Tabelas 21 e 22). Os teores de alumínio na fonte N-NH₄ foram mais elevados que nos demais tratamentos, a diferença, porém, não foi significativa (Figura 5). Wisniewski *et al.* (1997) sugerem que erva-mate é espécie acumuladora de alumínio e manganês. Chá (*Camellia sinensis*) também é acumuladora de alumínio, sendo que a espécie não só tolera altos conteúdos de alumínio, como seu crescimento é fortemente favorecido pela adição de alumínio (Konishi *et al.*, 1985). Plantas acumuladoras apresentam alta tolerância a elementos minerais tóxicos (alumínio e manganês), possuem baixa demanda interna por nutrientes e apresentam uma translocação e compartimentalização efetiva de nutrientes (Marschner, 1995). Se erva-mate é efetivamente acumuladora de alumínio, os menores teores do elemento na fração rizosférica do solo podem estar indicando um aumento na absorção do mesmo, com conseqüente diminuição do elemento na região de influência das raízes. Pode estar havendo também uma complexação do alumínio, não detectada pelo método usado.

Os teores de fósforo e matéria orgânica não diferiram entre as duas frações de solo, entre tratamentos ou épocas de coleta dos dados (Tabelas 21 a 22). Cabe destacar, porém, os valores elevados de fósforo, em ambas as frações de solo, se comparados aos propostos por Sosa (1995) ou os apresentados por Wisniewski e Curcio (1997).

O sódio se concentrou fortemente na fração rizosférica do solo, apresentando teores aproximadamente duas vezes superiores aos encontrados na fração não rizosférica (Tabelas 21 e 22). Não houveram diferenças entre tratamentos, independente da fração do solo ou da época de coleta dos dados (Tabela 23 e 24). Estes dados confirmam os obtidos no primeiro experimento deste trabalho. Chama a atenção neste trabalho os baixos teores de potássio nas plantas e no solo e o elevado teor de sódio no solo rizosférico. Marschner (1995) destaca que plantas podem ser classificadas em quatro grupos de acordo com as diferenças nas suas respostas de crescimento ao sódio: a) alta proporção de potássio pode ser substituída por sódio sem efeito sobre o crescimento e ocorre um crescimento

adicional, que não pode ser obtido pela adição de potássio; b) são observadas respostas específicas de crescimento devido ao sódio, mas elas são bem menos evidentes e ao mesmo tempo diminui a proporção de potássio que pode ser substituída sem perda de crescimento; c) a substituição só ocorre de forma limitada e o sódio não tem efeito sobre o crescimento; e d) não é possível a substituição do potássio. Nos dois experimentos deste trabalho não foram analisados os teores de sódio na planta, mas os teores observados na fração rizosférica indicam a necessidade de se verificar a possibilidade de erva-mate poder ser enquadrada em uma das três primeiras categorias propostas por Marschner (1995).

Os valores de capacidade de troca de cátions (CTC) não diferiram entre as frações do solo nos tratamentos testemunha, N-NO₃ e uréia, mas foram significativamente superiores na fração rizosférica, na fonte N-NH₄, em ambas as coletas (Tabelas 21 e 22). A fonte N-NH₄ diferiu também, quanto aos valores de CTC, da testemunha na primeira coleta e da testemunha mais da fonte uréia na segunda coleta, na fração rizosférica do solo (Tabelas 23 e 24). Os valores de CTC observados são considerados altos de acordo com a classificação geral proposta por Mello *et al.*(1983), mas estão dentro da faixa observada a campo, nas camadas superficiais de solos na região de ocorrência natural de erva-mate, observados por Lourenço *et al.*(1997a).

Os valores da soma de bases (S) só não diferiram entre a fração rizosférica e a não rizosférica na testemunha, enquanto em todos os tratamentos nitrogenados os valores de S foram mais elevados na fração rizosférica do solo, independente da época de avaliação (Tabelas 21 e 22). Ao mesmo tempo, os tratamentos nitrogenados apresentaram valores de S estatisticamente superiores à testemunha (Tabelas 23 e 24). Os valores de S aqui observados são considerados elevados de acordo com a classificação geral proposta por Mello *et al.*(1983) e muito superiores às apresentadas por Lourenço *et al.*(1997a) com dados obtidos à campo, em três tipos de solo a diferentes profundidades.

A análise global do segundo experimento apresenta um solo com elevada CTC e S, teores adequados de cálcio, magnésio e elevados de fósforo. Apesar de em alguns parâmetros haver um aumento significativo nos teores de nutrientes no solo, decorrente do uso de diferentes fontes de nitrogênio, os valores observados na testemunha eram suficientes para um bom desenvolvimento das mudas de erva-

mate. Esses fatos podem ter contribuído para a falta de resposta das mudas em termos de incremento de biomassa e mesmo a pouca existência de diferença entre os nutrientes na composição dessa biomassa. Chama a atenção a diminuição dos teores de alumínio e o acúmulo de magnésio e sódio na fração rizosférica do solo, associados a ausência de variações significativas de pH nesta região do solo e de respostas na composição e produção de biomassa pelas mudas de erva-mate. Assim, faz-se necessário observar possíveis alterações referentes a aspectos fisiológicos da planta, visando esclarecer os processos estabelecidos em mudas de erva-mate submetidas a diversas fontes de nitrogênio.

TABELA 21: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS FRAÇÕES NÃO RIZOSFÉRICA E RIZOSFÉRICA DO SOLO, EM MUDAS DE ERVA-MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Fração do solo	Tratamento			
		Testemunha	NO ₃	Uréia	NH ₄
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4,69a ¹	4,64a	4,63b	4,70a
	Rizosférico	4,87a	4,78a	5,10a	4,81a
K (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	0,13a	0,13a	0,14a	0,14a
	Rizosférico	0,13a	0,13a	0,14a	0,12a
Ca (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	4,56a	5,27a	4,85a	4,82a
	Rizosférico	5,40a	6,05a	5,68a	5,83a
Ca+Mg (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	4,99a	5,67b	5,51b	5,41b
	Rizosférico	6,08a	7,83a	7,97a	8,05a
Al (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	0,81a	1,37a	1,06a	1,12a
	Rizosférico	0,63a	0,63b	0,62a	1,00a
H+Al (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	12,28a	11,61a	10,51a	10,15a
	Rizosférico	8,77b	9,05a	9,31a	11,60a
Mg (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	0,43a	0,45b	0,65b	0,59b
	Rizosférico	0,68a	1,78a	2,29a	2,22a
H (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	11,47a	10,24a	9,86a	9,03a
	Rizosférico	8,14b	8,42a	8,69a	10,60a
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	83,43a	79,93a	75,54a	75,72a
	Rizosférico	76,21a	74,42a	105,16a	77,46a
P(mg/dm ³)	Não rizosférico	10,97a	12,70a	10,27a	9,96a
	Rizosférico	16,73a	15,23a	13,67a	13,76a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	12,33b	12,33b	11,33b	12,67a
	Rizosférico	25,33a	23,00a	23,67a	20,33a
CTC ² (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	17,4a	17,5a	16,2a	15,7b
	Rizosférico	15,0a	17,0a	17,4a	19,8a
S ³ (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	5,11a	5,85b	5,65b	5,55b
	Rizosférico	6,2a	7,96a	8,11a	8,18a

¹ - valores seguidos das mesmas letras, na coluna, dentro de cada tratamento, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - CTC = S+H+Al;

³ - S=Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺

TABELA 22: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS FRAÇÕES NÃO RIZOSFÉRICA E RIZOSFÉRICA DO SOLO, EM MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Fração do solo	Tratamento			
		Testemunha	NO ₃	Uréia	NH ₄
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4,67a ¹	4,60a	4,50a	4,57a
	Rizosférico	4,77a	4,80a	4,82a	4,70a
K (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	0,12a	0,12a	0,17a	0,13a
	Rizosférico	0,11a	0,12a	0,12a	0,14a
Ca (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	4,42a	5,36a	4,72a	4,58b
	Rizosférico	5,36a	6,28a	5,65a	6,51a
Ca+Mg (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	4,86a	5,67b	5,18b	5,14b
	Rizosférico	5,97a	7,86a	7,66a	8,06a
Al (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	1,19a	1,29a	1,19a	1,40a
	Rizosférico	0,69a	0,65b	0,78a	1,12a
H+Al (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	11,73a	11,09a	10,70a	10,96a
	Rizosférico	8,93a	9,60a	8,24a	11,73a
Mg (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	0,44a	0,32b	0,45b	0,56a
	Rizosférico	0,61a	1,58a	2,00a	1,55a
H (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	10,54a	9,80a	9,51a	9,56a
	Rizosférico	8,24a	8,95a	7,46a	10,51a
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	89,57a	85,05a	72,99a	78,53a
	Rizosférico	73,84a	86,84a	89,43a	75,43a
P(mg/dm ³)	Não rizosférico	10,43a	10,23a	10,60a	11,27a
	Rizosférico	12,00a	16,36a	14,40a	13,13a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	12,67b	11,67b	12,33b	12,67b
	Rizosférico	25,33a	23,00a	23,67a	23,67a
CTC ² (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	16,7a	16,9a	16,0a	16,2b
	Rizosférico	15,0a	17,6a	16,0a	19,9a
S ³ (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	4,98a	5,78b	5,34b	5,27b
	Rizosférico	6,07a	7,98a	7,78a	8,20a

¹ - valores seguidos das mesmas letras, na coluna, dentro de cada tratamento, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - CTC = S+H+Al;

³ - S=Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺

TABELA 23: EFEITO DE DIFERENTES FONTES DE N SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Fração do solo	Tratamento			
		Testemunha	NO ₃	Uréia	NH ₄
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4,69a ¹	4,64a	4,63a	4,70a
	Rizosférico	4,87a	4,78a	5,10a	4,81a
K (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	0,13a	0,13a	0,14a	0,14a
	Rizosférico	0,13a	0,13a	0,14a	0,12a
Ca (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	4,56a	5,27a	4,85a	4,82a
	Rizosférico	5,40a	6,05a	5,68a	5,83a
Ca+Mg (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	4,99a	5,67a	5,51a	5,41a
	Rizosférico	6,08b	7,83a	7,97a	8,05a
Al (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	0,81b	1,37a	1,06ab	1,12ab
	Rizosférico	0,63a	0,63a	0,62a	1,00a
H+Al (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	12,28a	11,61a	10,51a	10,15a
	Rizosférico	8,77a	9,05a	9,31a	11,60a
Mg (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	0,43a	0,45a	0,65a	0,59a
	Rizosférico	0,68b	1,78a	2,29a	2,22a
H (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	11,47a	10,24a	9,86a	9,03a
	Rizosférico	8,14a	8,42a	8,69a	10,60a
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	83,43a	79,93a	75,54a	75,72a
	Rizosférico	76,21a	74,42a	105,16a	77,46a
P(mg/dm ³)	Não rizosférico	10,97a	12,70a	10,27a	9,96a
	Rizosférico	16,73a	15,23a	13,67a	13,76a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	12,33a	12,33a	11,33a	12,67a
	Rizosférico	25,33a	23,00a	23,67a	20,33a
CTC ² (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	17,4a	17,5a	16,2a	15,7a
	Rizosférico	15,0b	17,0ab	17,4ab	19,8a
S ³ (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	5,11a	5,85a	5,65a	5,55a
	Rizosférico	6,20b	7,96a	8,11a	8,18a

¹ - valores seguidos das mesmas letras, na linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - CTC = S+H+Al;

³ - S=Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺

TABELA 24: EFEITO DE DIFERENTES FONTES DE N SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO TRATAMENTO 2. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Fração do solo	Tratamento			
		Testemunha	NO ₃	Uréia	NH ₄
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4.67a ¹	4.60a	4.50a	4.57a
	Rizosférico	4.77a	4.80a	4.82a	4.70a
K (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	0.12a	0.12a	0.17a	0.13a
	Rizosférico	0.11a	0.12a	0.12a	0.14a
Ca (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	4.42a	5.36a	4.72a	4.58a
	Rizosférico	5.36b	6.28ab	5.65ab	6.51a
Ca+Mg (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	4.86a	5.67a	5.18a	5.14a
	Rizosférico	5.97b	7.86a	7.66a	8.06a
Al (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	1.19a	1.29a	1.19a	1.40a
	Rizosférico	0.69a	0.65a	0.78a	1.12a
H+Al (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	11.73a	11.09a	10.70a	10.96a
	Rizosférico	8.93ab	9.60ab	8.24b	11.73a
Mg (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	0.44a	0.32a	0.45a	0.56a
	Rizosférico	0.61b	1.58ab	2.00a	1.55ab
H (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	10.54a	9.80a	9.51a	9.56a
	Rizosférico	8.24ab	8.95ab	7.46b	10.61a
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	89.57a	85.05a	72.99a	78.53a
	Rizosférico	73.84a	86.84a	89.43a	75.43a
P(mg/dm ³)	Não rizosférico	10.43a	10.23a	10.60a	11.27a
	Rizosférico	12.00a	16.36a	14.40a	13.13a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	12.67a	11.67a	12.33a	12.67a
	Rizosférico	25.33a	23.00a	23.67a	23.67a
CTC ² (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	16.7a	16.9a	16.0a	16.2a
	Rizosférico	15.0b	17.6ab	16.0b	19.9a
S ³ (cmol _e /dm ³)	Não rizosférico	4.98a	5.78a	5.34a	5.27a
	Rizosférico	6.07b	7.98a	7.78a	8.20a

¹ - valores seguidos das mesmas letras, na linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

² - CTC = S+H+Al;

³ - S=Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺

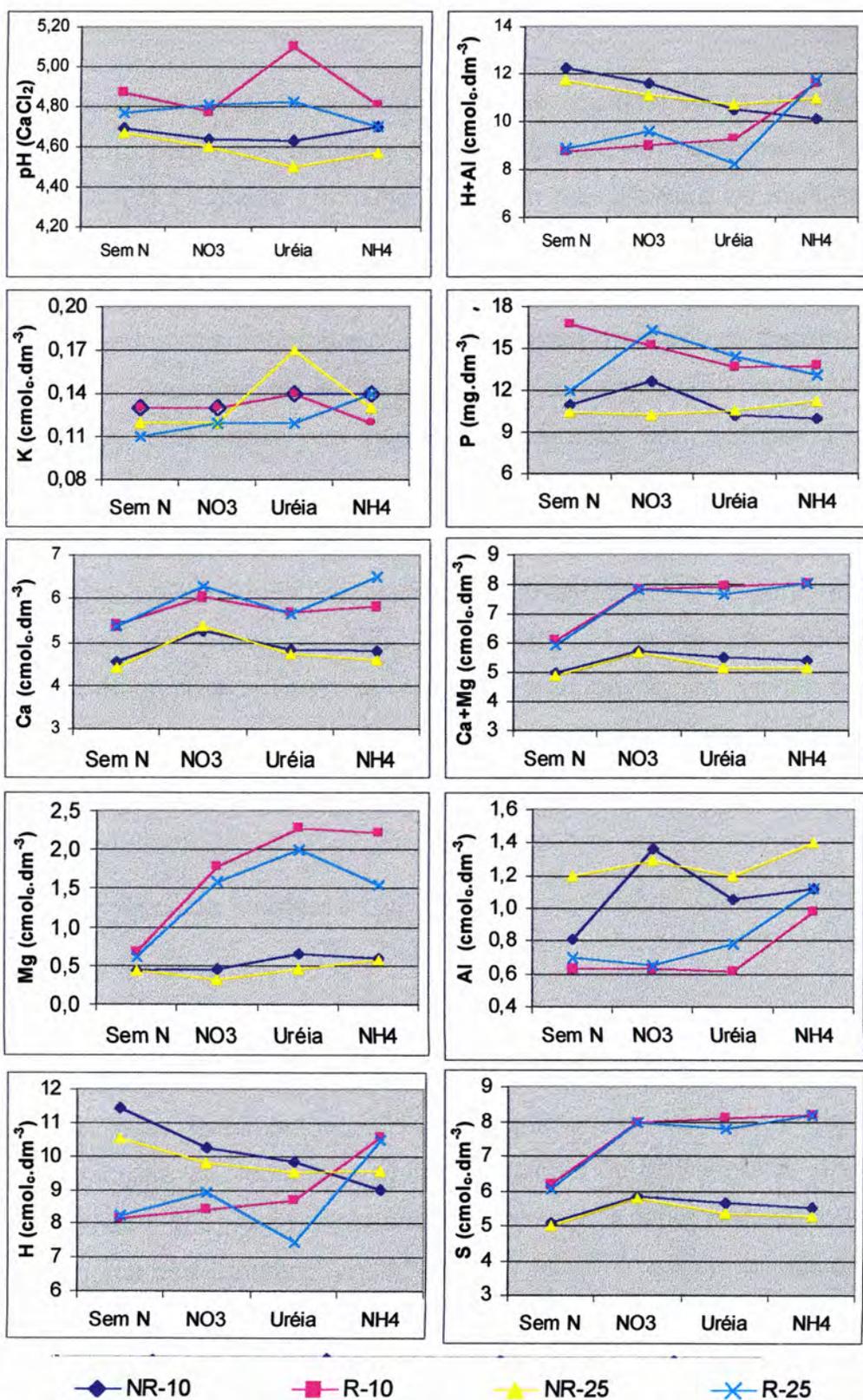


FIGURA 5 - RESPOSTA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO À DIFERENTES FONTES DE N, NAS FRAÇÕES DE SOLO NÃO RIZOSFÉRICO (NR) E RIZOSFÉRICO (R), NAS DUAS AVALIAÇÕES REALIZADAS (10 E 25 DIAS), NO EXPERIMENTO 2.

4.3 EXPERIMENTO 3

No experimento 2 as alterações nas características químicas do solo permaneceram pequenas, semelhante ao observado no experimento 1. Em ambos os experimentos foi usado o mesmo solo, com teor elevado de matéria orgânica e boa disponibilidade geral de nutrientes. Assim, nesse terceiro experimento, optou-se por usar um LATOSSOLO VERMELHO, com baixo teor de matéria orgânica e nutricionalmente mais pobre que o anterior. Foram mantidos os tratamentos usados no segundo experimento e acrescentado o acompanhamento de possíveis alterações da fotossíntese nas mudas de erva-mate, em resposta à aplicação de diferentes fontes de nitrogênio.

Os resultados da análise de variância ($p < .10$) referente à biomassa dos diferentes compartimentos estudados de erva-mate no experimento 3, estão apresentados no Anexo 11. Nos Anexos 12, 13, e 14 são apresentados os resultados da análise de variância referentes ao caule, folhas velhas e folhas novas respectivamente, enquanto no Anexo 15 encontram-se os resultados da análise de variância referente às características químicas do solo utilizado.

4.3.1 Parâmetros de Biomassa

Nesse experimento, para os parâmetros de biomassa, se optou por trabalhar com o ganho ocorrido, nos diversos compartimentos, entre o 10º e o 25º dia após a aplicação dos tratamentos. Os compartimentos também foram alterados considerando-se as biomassas: a) foliar, englobando folhas novas e velhas usados no experimento 2; b) radicial; c) aéreo, englobando o caule mais as folhas; e d) total, sendo a soma dos compartimentos radicial e aéreo. A adição de diferentes fontes de nitrogênio influenciou positivamente o ganho de biomassa, nos diferentes compartimentos, de mudas de erva-mate (Tabela 25). Enquanto o ganho de biomassa na fonte N-NO₃ não diferiu significativamente dos demais tratamentos, as fontes uréia e N-NH₄ proporcionaram um incremento diferenciado em relação à testemunha em praticamente todos os compartimentos das plantas, exceto nas

raízes. O ganho de biomassa na fonte N-NH₄ foi superior ainda ao da fonte N-NO₃ e ao da testemunha, quando considerarmos a biomassa total da planta. Chama a atenção o fato do ganho em biomassa radicial na testemunha ter sido mais elevado que o ganho em biomassa aérea, enquanto nos tratamentos nitrogenados o ganho de biomassa aérea foi maior que o radicial (Tabela 25). O crescimento radicial pode ser favorecido quando nitrogênio é limitante no meio (Stulen, *et al.*, 1993).

TABELA 25 - GANHO DE BIOMASSA (g) NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10^o E 25^o DIA APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Biomassa	Tratamentos			
	Testemunha	Uréia	NO ₃	NH ₄
Foliar	0.59b ¹	2.14a	1.21ab	2.19a
Radicial	1.26a	1.74a	1.25a	2.19a
Aérea	0.83b	2.73a	1.75ab	3.05a
Total	2.09c	4.47ab	3.00bc	5.24a

¹ - valores seguidos das mesmas letras, na linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey;

A adição de nitrogênio afetou, ainda, a distribuição de biomassa nos compartimentos das mudas de erva-mate (Figura 6). Enquanto na testemunha, as proporções entre os compartimentos das plantas permaneceram praticamente inalteradas com o tempo, nos tratamentos nitrogenados houve uma diminuição na proporção de folhas velhas em consequência do aumento de folhas novas, bem como, um aumento no crescimento das raízes. Proporcionalmente, folhas novas tiveram um aumento de 2% na testemunha, contra 6% nas fontes N-NO₃ e N-NH₄, enquanto a proporção de raízes diminuiu 1% na testemunha e aumentou 5% na fonte N-NH₄. Em decorrência disso a diminuição da proporção de folhas velhas na testemunha foi de apenas 2%, ao mesmo tempo em que esta redução chegou a 7%, 10% e 11% nas fontes uréia, N-NO₃ e N-NH₄, respectivamente (Figura 6). Estes resultados diferem em parte dos obtidos no segundo experimento, onde a proporção de raízes sofreu forte aumento na testemunha entre a primeira e a segunda coleta (Figura 4), comparativamente a este em que a proporção de raízes permaneceu

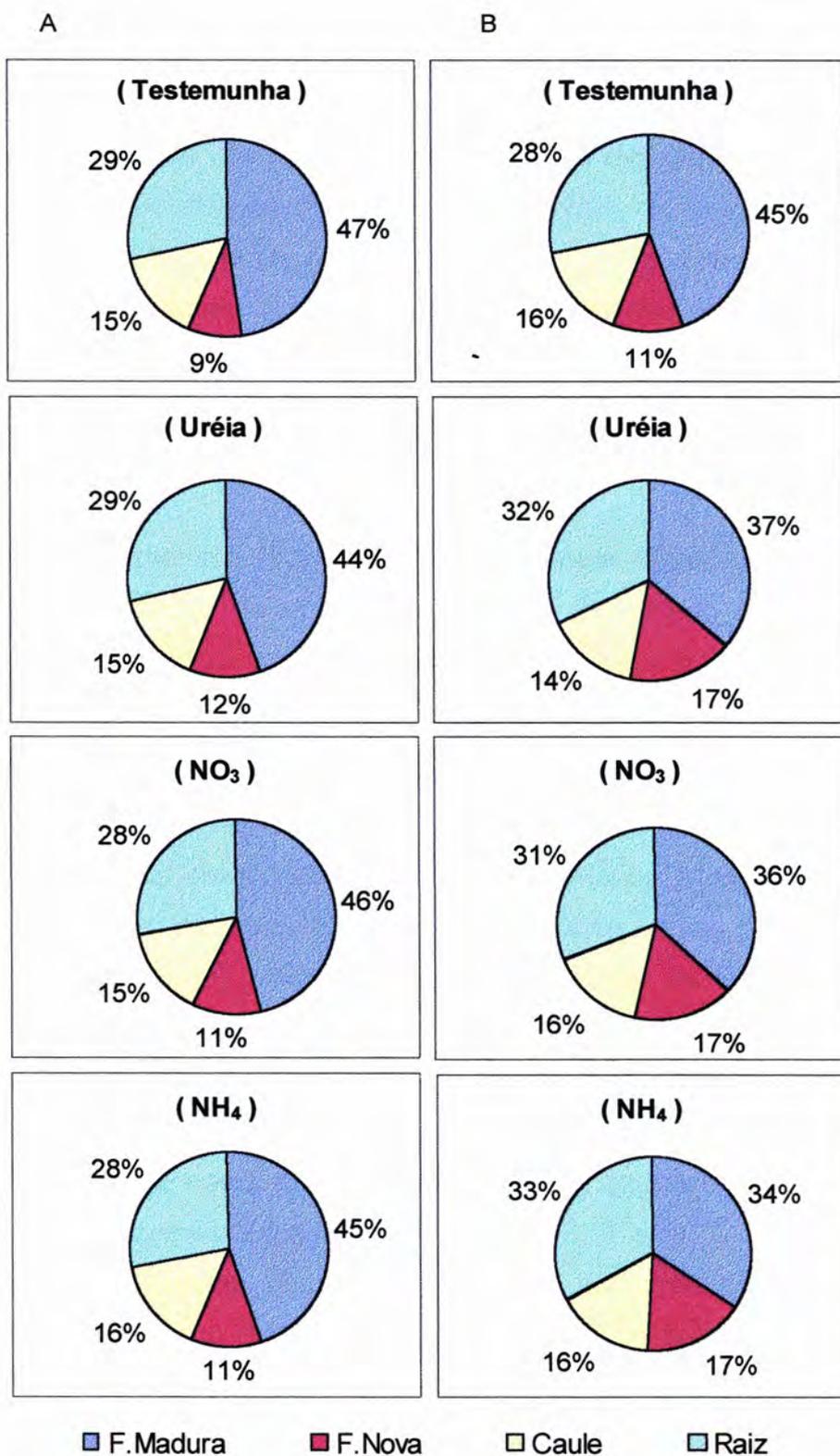


FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DE MUDAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (A = 10 DIAS E B = 25 DIAS), NO EXPERIMENTO 3.

inalterada entre as duas coletas (Figura 6). De maneira geral, neste experimento, a proporção de folhas (velhas + novas) foi superior às encontradas no segundo experimento. Estas diferenças podem ter ocorrido em função das diferenças na qualidade nutricional dos diferentes solos usados em cada experimento e também em função das épocas de crescimento das mudas, durante o outono no segundo experimento e durante a primavera neste, o que pode ter provocado uma distribuição diferenciada de biomassa nas mudas de erva-mate.

4.3.2 Composição Química da Biomassa

A exemplo dos outros dois experimentos desse trabalho, os teores de nutrientes em mudas de erva-mate variaram em função do compartimento das mudas, dos tratamentos e do tempo decorrido após sua aplicação.

A distribuição do nitrogênio nos compartimentos das mudas de erva-mate seguiu a mesma tendência dos experimentos anteriores, com maior concentração nas folhas novas (Tabela 26), porém, a variação entre os compartimentos foi menos acentuada que os observados anteriormente, quando a diferença era geralmente mais que o dobro daquelas encontradas nas folhas velhas e o triplo das do caule (Tabelas 11, 15 e 16). Cabe destacar, também, que os teores de nitrogênio dos compartimentos caule e folhas velhas foram similares aos dos encontrados nos demais experimentos, enquanto os observados nas folhas novas foram menores. Isto pode estar refletindo uma condição de menor disponibilidade de nutrientes às plantas crescendo neste solo que apresenta condições nutricionais inferiores aos dos solos dos demais experimentos (Tabelas 6, 8 e 9). Observa-se ainda, nesse experimento, respostas bem diferenciadas à aplicação das diversas fontes de nitrogênio. Assim, no 10^o dia, as fontes N-NO₃ e N-NH₄ apresentaram teores significativamente superiores à testemunha e à uréia, no caule, e à testemunha nas folhas velhas. No 25^o dia os teores de nitrogênio diferiram entre todos os tratamentos, no caule, com os maiores teores ocorrendo seqüencialmente para N-NO₃, N-NH₄, uréia e testemunha (Tabela 27). No compartimento folhas velhas os teores de nitrogênio foram mais elevados nas fontes N-NO₃ e N-NH₄, comparativamente à testemunha e uréia, enquanto nas folhas novas a diferença

ocorreu somente entre os tratamentos nitrogenados e a testemunha (Tabela 27). Essas diferenças ficam ainda mais marcantes quando consideramos o acúmulo de nitrogênio entre o 10º e o 25º dia após a aplicação dos tratamentos, ou seja, a diferença entre os conteúdos no 25º e no 10º dia. Os conteúdos de nitrogênio acumulados no período, foram de 6 a 10 vezes superiores nos tratamentos nitrogenados, em comparação com a testemunha, mas não diferiram estatisticamente entre fontes de nitrogênio (Tabela 28).

Os teores de fósforo não foram afetados pela aplicação de diferentes fontes de nitrogênio, a exemplo do ocorrido nos experimentos anteriores. (Tabelas 26 e 27), porém, o acúmulo de fósforo na fonte N-NH₄ foi superior ao da testemunha e ao da fonte N-NO₃ na biomassa aérea (Tabela 28). Houve, ainda, um decréscimo no conteúdo de fósforo em todos os compartimentos aéreos das mudas de erva-mate na testemunha e na fonte N-NO₃.

O fósforo apresenta elevada mobilidade dentro da planta, apresentando preferência por sítios de alta atividade meristemática (Larcher, 2000). Observou-se nos parâmetros de biomassa (Tabela 25) que a testemunha apresentou maior ganho de biomassa radicial que aérea, indicando uma intensa atividade naquele compartimento da planta. Somando-se a isso, os teores de fósforo no solo original (um cmol/dm³), nível considerado como característico de baixa produtividade de erva-mate por Sosa (1995) e considerando que em casos de deficiência de fósforo pode haver translocação da parte aérea para o sistema radicial em algumas espécies (Smith *et al.*, 1990), pode-se supor que a diminuição no conteúdo de fósforo na parte aérea desse experimento tenha ocorrido em função de uma translocação de fósforo para o sistema radicial que estava em pleno desenvolvimento.

O teor de potássio na fonte N-NO₃, no caule, foi significativamente superior ao observado com a aplicação de uréia aos 10 dias e maior que a dos demais tratamentos, na coletas aos 25 dias. Não houve diferença entre tratamentos, com relação ao teor de potássio nas folhas velhas. Nas folhas novas a testemunha apresentou teor superior ao da fonte uréia, aos 10 dias enquanto aos 25 dias, o teor na fonte N-NO₃ foi superior ao da testemunha (Tabelas 26 e 27). Os teores de potássio, aqui observados, se equivalem ao dos experimentos anteriores, para o compartimento folhas novas, enquanto aqueles determinados nas folhas velhas

variaram de forma marcante entre os três experimentos. De forma oposta, porém, o maior acúmulo de potássio ocorreu na biomassa aérea nos tratamentos uréia e N-NH₄ com valores significativamente superiores em relação à testemunha e embora mais elevados que o da fonte N-NO₃, a diferença entre estes não foi significativa.

O teor de cálcio foi sempre maior com a aplicação da fonte N-NO₃, relativamente aos demais tratamentos, independente do compartimento da planta ou da época de coleta dos dados (Tabelas 26 e 27). O conteúdo de cálcio acumulado entre o 10^o e o 25^o dia, na fonte N-NO₃, foi pelo menos o dobro do observado nos outros tratamentos (Tabela 28). Nos demais experimentos as diferenças existentes ocorriam somente entre alguns tratamentos. Os resultados obtidos neste terceiro experimento confirmam dados de literatura que indicam uma maior absorção de cálcio com o uso da fonte nítrica (Tidale *et al.*, 1993; Marschner, 1995). Observa-se ainda que os teores desse experimento são bem menores que os registrados nos experimentos anteriores. Isto deve estar diretamente relacionado à disponibilidade de cálcio no substrato. Enquanto no primeiro experimento os teores de cálcio no solo original eram de 5,52 cmol_c.dm⁻³, acrescido do cálcio da solução nutritiva, e de 5,98 cmol_c.dm⁻³, no segundo, neste terceiro o teor original foi de 0,97 cmol_c.dm⁻³.

Os teores de magnésio não diferiram entre tratamentos, compartimentos das plantas ou época de coleta dos dados (Tabela 26 e 27). A exemplo do observado com cálcio, os teores de magnésio no solo original, dos três experimentos, foram de 4,00, 3,28 e 1,34 cmol_c.dm⁻³ para o primeiro, segundo e terceiro experimentos, respectivamente. Assim, os baixos teores de magnésio observados, na biomassa aérea das mudas de erva-mate, neste terceiro experimento, comparativamente aos dos dois experimentos anteriores, apresentam coerência com os teores de magnésio no solo original, o qual deve ter influenciado diretamente na disponibilidade do elemento para as mudas. Por outro lado, um maior acúmulo de magnésio entre o 10^o e 25^o dia ocorreu para as fontes uréia e N-NH₄, comparativamente a testemunha e à fonte N-NO₃, embora as diferenças para uréia não tenham sido significativas. magnésio é um dos elementos principais na molécula de clorofila, sendo, portanto, elemento chave no processo de fotossíntese, além de ser essencial na ativação de um grande número de enzimas (Clarkson & Hanson, 1980). Este maior acúmulo de magnésio nos tratamentos N-NH₄ e uréia coincidem com os aumentos nas taxas de

fotossíntese líquida obtidas neste experimento (Figura 14), e que são discutidas mais adiante.

De maneira geral, os teores de cobre não diferiram entre tratamentos ou épocas de coleta de dados (Tabela 26 e 27). Nos dois primeiros experimentos, houve uma maior concentração de cobre nas folhas novas, ao passo que neste experimento as diferenças entre compartimentos foram menos acentuadas. Os teores de cobre, especialmente nas folhas novas, foram bem menores neste experimento do que os observados nos anteriores. O cobre tem se mostrado bastante estável frente a procedimentos de manejo. Em um experimento com calagem, foi o único elemento que não apresentou variação em seu teor entre os diferentes níveis de calcáreo (Reissmann *et al.*, 1997).

Os teores de ferro foram menores nas folhas novas em todos os tratamentos, em ambas as coletas (Tabela 26 e 27). Esse comportamento é equivalente ao do primeiro experimento, mas difere dos dados do segundo onde os teores de ferro foram mais elevados. Apesar da diferença em relação ao segundo experimento, os teores observados ainda se enquadram na faixa de alta produtividade de erva-mate proposto por Sosa (1985).

Os teores de manganês, a exemplo dos experimentos anteriores, foram superiores nas folhas velhas (Tabelas 26 e 27). Chama a atenção, porém, os elevados teores nas folhas novas, fato que não havia ocorrido nos demais experimentos desse trabalho. Isso pode estar relacionado a maiores teores de manganês no solo e/ou a uma menor competição com outros cátions no processo de absorção. Os teores de potássio, cálcio e magnésio no LATOSSOLO VERMELHO usado nesse experimento foram inferiores aos observados no CAMBISSOLO HÁPLICO usado nos experimentos anteriores.

Os teores de zinco mantiveram as mesmas tendências observadas nos experimentos anteriores, sem apresentar diferenças entre tratamentos ou época de coleta de dados.

TABELA 26: TEOR DE MACRO (g.kg^{-1}) E MICRONUTRIENTES (mg.kg^{-1}), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTO EM MUDAS DE ERVA-MATE, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos			
		Sem N	Uréia	NO_3	NH_4
N	Caule	7,77b	8,59b	13,03a	11,82a
	Folha Velha	13,47b	14,97ab	16,00a	16,45a
	Folha Nova	19,11a	20,28a	21,92a	22,36a
P	Caule	0,74a	0,75a	0,84a	0,75a
	Folha Velha	0,70a	0,71a	0,69a	0,62a
	Folha Nova	1,29a	1,12a	1,17a	1,08a
K	Caule	7,81ab	7,15b	9,07a	8,42ab
	Folha Velha	9,41a	8,69a	9,24a	8,97a
	Folha Nova	16,06a	13,64b	15,12ab	14,41ab
Ca	Caule	3,06b	2,71b	5,09a	2,62b
	Folha Velha	3,20b	3,17b	5,01a	3,12b
	Folha Nova	2,43b	2,43b	5,13a	2,28b
Mg	Caule	2,81a	2,81a	2,85a	2,71a
	Folha Velha	2,93a	2,84a	3,17a	3,04a
	Folha Nova	2,41a	2,51a	2,23a	2,46a
Cu	Caule	6,67a	6,33a	6,33a	8,00a
	Folha Velha	5,00a	5,00a	5,67a	5,67a
	Folha Nova	7,33a	7,00a	8,33a	9,33a
Fe)	Caule	105a	107a	143a	128a
	Folha Velha	155a	159a	146a	129a
	Folha Nova	56a	58a	52a	53a
Mn	Caule	144ab	175a	118b	185a
	Folha Velha	976a	1029a	1121a	1034a
	Folha Nova	632a	803a	727a	797a
Zn)	Caule	147a	150a	154a	144a
	Folha Velha	84a	90a	85a	84a
	Folha Nova	68a	83a	68a	70a

- valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

TABELA 27: TEOR DE MACRO (g.kg^{-1}) E MICRONUTRIENTES (mg.kg^{-1}), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTO EM MUDAS DE ERVA-MATE, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos			
		Sem N	Uréia	NO_3	NH_4
N	Caule	7,51d	10,22c	15,39a	12,21b
	Folha Velha	13,03b	14,43b	16,99a	17,01a
	Folha Nova	15,91b	25,41a	28,26a	27,87a
P	Caule	0,47a	0,44a	0,54a	0,48a
	Folha Velha	0,50a	0,46a	0,48a	0,48a
	Folha Nova	0,83a	0,81a	0,81a	0,84a
K	Caule	7,42b	6,99b	9,85a	7,26b
	Folha Velha	7,87a	7,04a	7,31a	7,87a
	Folha Nova	12,21b	12,27ab	13,97a	12,61ab
Ca	Caule	3,45b	2,70b	8,26a	2,43b
	Folha Velha	3,27b	3,09b	6,12a	3,13b
	Folha Nova	2,45b	2,18b	5,21a	2,48b
Mg	Caule	3,03a	2,50a	2,48a	2,62a
	Folha Velha	3,08a	2,99a	3,21a	3,05a
	Folha Nova	2,39ab	2,25ab	2,14b	2,60a
Cu	Caule	4,33a	4,67a	5,33a	6,00a
	Folha Velha	5,00a	7,00a	4,67a	4,67a
	Folha Nova	5,33a	5,67a	7,33a	7,67a
Fe	Caule	103a	72a	82a	113a
	Folha Velha	187a	181a	166a	147a
	Folha Nova	69a	61a	58a	77a
Mn	Caule	134a	134a	141a	147a
	Folha Velha	982a	1050a	1043a	969a
	Folha Nova	506a	530a	513a	520a
Zn)	Caule	124a	137a	126a	132a
	Folha Velha	65a	79a	73a	67a
	Folha Nova	51a	58a	56a	51a

- valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

TABELA 28: ACÚMULO DE NUTRIENTES (mg.parcela⁻¹), NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DAS MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10^o E 25^o DIA APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Compartimento	Tratamentos			
		Testemunha	Uréia	NO ₃	NH ₄
N	Foliar	5,88b	48,07a	46,35a	60,40a
	Caule	1,48b	8,32ab	12,26a	11,11a
	Aéreo	7,36b	56,39a	58,61a	71,51a
P	Foliar	-0,76b	0,07ab	-0,50b	0,71a
	Caule	-0,32a	-0,16a	-0,16a	0,00a
	Aéreo	-1,08b	-0,09ab	-0,66b	0,71a
K	Foliar	-2,35b	13,11a	5,41ab	17,02a
	Caule	1,30b	3,95ab	6,53a	4,56ab
	Aéreo	-1,05b	17,06a	11,95ab	21,58a
Ca	Foliar	1,38b	4,39b	12,10a	5,16b
	Caule	1,45b	1,61b	9,68a	1,85b
	Aéreo	2,83b	6,54b	21,78a	7,01b
Mg	Foliar	1,85a	5,84a	2,89a	6,14a
	Caule	1,10ab	1,05ab	0,75b	2,17a
	Aéreo	2,95b	6,89ab	3,64b	8,30a
Cu	Foliar	0,0016b	0,0196a	0,0027b	0,0077ab
	Caule	-0,0024a	0,0004a	0,0010a	0,0023a
	Aéreo	-0,0008b	0,0200a	0,0037ab	0,0100ab
Fe	Foliar	0,1345a	0,3374a	0,1907a	0,3313a
	Caule	0,0218ab	-0,0054ab	-0,0523b	0,0766a
	Aéreo	0,1563a	0,3320a	0,1383a	0,4079a
Mn	Foliar	-0,0837a	1,3835a	0,0680a	0,8941a
	Caule	0,0200a	0,0225a	0,1048a	0,0741a
	Aéreo	-0,0637a	1,4060a	0,1728a	0,9682a
Zn	Foliar	-0,0853a	0,0720a	-0,0062a	0,0261a
	Caule	0,0008a	0,0616a	0,0263a	0,0943a
	Aéreo	-0,0845a	0,1336a	0,0200a	0,1204a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

4.3.3 Alterações nas Características Químicas do Solo

Alterações provocadas pela adição das diferentes fontes de nitrogênio sobre as frações não rizosférica e rizosférica do solo são apresentadas nas tabelas 29 e 30, e na figura 7. A exemplo do ocorrido no segundo experimento, a aplicação de uréia proporcionou uma elevação do pH da fração rizosférica na primeira avaliação, aos 10 dias, ao mesmo tempo em que a fonte N-NH₄ induziu uma diminuição do pH naquela fração do solo, fazendo com que a diferença entre os dois tratamentos fosse estatisticamente significativa (Tabela 29). Na segunda observação, aos 25 dias, os valores de pH da fração rizosférica, com a aplicação de N-NH₄ permaneceram praticamente inalteradas em relação à observação do 10º dia, enquanto os valores de pH observados com a aplicação de uréia, sofreram uma queda, se aproximando dos valores da testemunha e fazendo com que a diferença estatística observada no 10º dia, entre os tratamentos N-NH₄ e uréia, deixasse de existir (Tabela 30).

Esses resultados confirmam os obtidos em literatura quando do uso da fonte uréia, caracterizado pela elevação inicial do pH rizosférico, seguido de queda do mesmo até um ponto de equilíbrio (Wickramasinghe *et al.*, 1985; Tisdale *et al.*, 1993; Gregory & Hinsinger, 1999). Os resultados mostram pela primeira vez, no presente trabalho, o efeito de N-NH₄ relatado por diversos autores (Nye, 1981; Gijssman, 1990a; Gahoonia, 1992; Marschner, 1995; Zoysa *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2002), na acidificação da fração rizosférica do solo.

Nos dois experimentos anteriores, deste trabalho, os teores de matéria orgânica (MO) encontravam-se em níveis elevados no solo, tendo sido levantada a hipótese de que as variações no pH, especialmente na fração rizosférica, não estavam sendo evidenciadas devido a um tamponamento provocado pela MO existente. O uso de um solo com baixos teores de MO do experimento três parece ter confirmado aquela hipótese.

Merece atenção também, a influência da fonte N-NO₃ sobre o comportamento do solo rizosférico das mudas de erva-mate (Tabelas 29 e 30, Figura 7). Apesar das variações de pH terem sido mínimas, existiu uma tendência a elevação do pH. Esta tendência pode ser evidenciada não apenas pelas diferenças

de pH, mas por haver uma diminuição significativa na acidez potencial do solo (H+Al) e nos teores de alumínio trocável nas mudas que receberam a fonte N-NO₃, em comparação à fonte N-NH₄. Os valores de pH no solo não rizosférico não foram afetados pela adição de nitrogênio ou pela época de coleta dos dados (Tabelas 29 e 30)

Os teores de potássio não diferiram entre tratamentos, independente da época de coleta dos dados e da fração de solo (Tabelas 29 e 30). Houve, porém, uma diminuição significativa nos teores de potássio nos tratamentos uréia e N-NH₄ e em menor intensidade na fonte N-NO₃, entre o 10º e o 25º dia (Figura 7). Esta diminuição coincide com um aumento significativo no acúmulo de potássio, no mesmo período, na biomassa aérea das mudas de erva-mate deste experimento (Tabela 28), indicando provavelmente que os menores teores de potássio no solo rizosférico sejam decorrência de um esgotamento daquela fração do solo, em função de uma maior absorção pela planta. Tisdale *et al.* (1993) destacam que a diminuição de potássio na rizosfera pode ser causada pela absorção ativa do elemento pelas raízes. Como potássio é fortemente ligado aos constituintes do solo, a transferência para as raízes via fluxo de massa é insuficiente para atingir as necessidades das plantas (Schöttelndreier & Falkengren-Grerup, 1999), fazendo com que potássio seja absorvido em grande parte por difusão (Mengel, 1984), levando a um esgotamento do elemento na rizosfera. Tisdale *et al.* (1993) verificaram, ainda, que a absorção de potássio pode ser melhorada se outros elementos não forem limitantes ao desenvolvimento da planta. Talvez isto possa explicar o fato do aumento na absorção, neste experimento, ter ocorrido somente nos tratamentos que receberam alguma fonte de nitrogênio.

Os teores de cálcio foram superiores na fonte N-NO₃, em relação aos demais tratamentos, em ambas as coletas e nas duas frações do solo (Tabelas 29 e 30). Chama a atenção ainda, o fato que nos tratamentos testemunha, uréia e N-NH₄, os teores de cálcio pouco variaram entre a fração não rizosférica e rizosférica do solo, enquanto na fonte N-NO₃ existiu uma tendência de maior concentração no solo rizosférico. Esta diferença marcante entre a fonte N-NO₃ e os demais tratamentos não havia sido verificada nos experimentos anteriores, provavelmente devido aos elevados teores de cálcio no solo original dos mesmos. Como neste experimento os níveis de cálcio no solo original eram baixos, a adição de Ca(NO₃)₂ aumentou a

disponibilidade de cálcio na solução do solo, comparativamente aos demais tratamentos.

Os teores de magnésio não diferiram estatisticamente entre tratamentos, fração do solo ou época da coleta dos dados (Tabelas 29 e 30). Apesar da não existência de diferença significativa, o solo rizosférico de mudas que receberam o tratamento N-NO₃ apresentaram os menores teores de magnésio, o que coincide com os maiores teores de cálcio observados na rizosfera (Figura 7). Um excesso de cálcio na solução do solo pode prejudicar a absorção de magnésio (Mello *et al*, 1983). Os mesmos autores destacam que magnésio pode sofrer competição ainda por íons NH₄⁺, H⁺ e Na⁺, embora, aparentemente, neste experimento estes íons não influenciaram a absorção de magnésio.

Os teores de alumínio foram influenciados pela fonte de N aplicada. O solo de mudas que receberam a fonte N-NH₄ apresentou teores de alumínio mais elevados que os demais tratamentos (Tabelas 29 e 30). Na fração não rizosférica do solo os teores mais elevados em N-NH₄ não ocorreram em relação a todos os demais tratamentos, enquanto no solo rizosférico, aos 25 dias, os teores de N-NH₄ foram superiores a todos os demais tratamentos. Além das diferenças, cabe destacar a magnitude dos valores de alumínio. Enquanto neste experimento o teor máximo de alumínio foi superior a 3,8 cmol_c.dm⁻³ e o mínimo foi pouco superior a 1,7 cmol_c.dm⁻³, estes valores variam de 0,38 a 0,65 cmol_c.dm⁻³ no primeiro experimento e de 0,62 a 1,40 cmol_c.dm⁻³ no segundo. Altos teores de alumínio podem estar correlacionado com a inibição na absorção de cálcio e magnésio (Marschner, 1995). Sosa (1995) considera teores de alumínio superiores a 1,24 cmol_c.dm⁻³ como característico de sítios de baixa produtividade para erva-mate, ao passo que Wisniewski *et al.* (1997) apesar de indicarem que erva-mate é acumuladora de alumínio, não indicam quais os teores de alumínio encontrados em seus estudos. Os teores mais elevados de alumínio coincidem com os valores mais baixos de pH encontrados nos solo rizosférico do tratamento N-NH₄ (Tabelas 29 e 30), confirmando que a porcentagem de alumínio trocável no solo é correlacionada com o pH do solo (Marschner, 1995).

Os teores de hidrogênio diferiram de forma significativa entre tratamentos somente na fração rizosférica do solo, aos 10 dias, quando a concentração de hidrogênio, no tratamento N-NH₄ foi mais elevada que a do tratamento uréia. Estes

dados associados aos de alumínio fornecem a acidez potencial ($H+Al$) que apresentam a fonte $N-NH_4$ com teores mais elevados que os demais tratamentos, especialmente na fração rizosférica do solo (Tabelas 29 e 30). Os valores de acidez potencial seguiram a curva inversa do pH (Figura 7), confirmando a estreita relação entre os dois parâmetros (Mello *et al.*, 1983; Rajj, 1991).

Os teores de fósforo e matéria orgânica, a exemplo do ocorrido nos demais experimentos, não foram influenciados pela adição de diferentes fontes de nitrogênio (Tabelas 29 e 30). Merece destaque, porém, os teores muito mais baixos de fósforo, encontrados nas duas frações do solo, comparativamente aos dois experimentos anteriores. Este fato deve estar relacionado à menor concentração de fósforo, associado aos menores teores de matéria orgânica no solo original, deste experimento, em relação aos observados nos solos originais dos experimentos anteriores.

O sódio também apresentou comportamento equivalente ao dos demais experimentos, tanto em sua tendência de não apresentar diferença entre tratamentos, quanto à concentração na fração rizosférica do solo, inclusive com teores muito similares entre os experimentos. Assim, a concentração de sódio na rizosfera parece ser uma característica da espécie. Possíveis efeitos sobre a nutrição, fisiologia e desenvolvimento da espécie deveriam ser investigados.

A soma de bases (S) não sofreu influência significativa das diferentes fontes de nitrogênio, independente da época de coleta ou da fração do solo (Tabelas 29 e 30). De forma semelhante, os valores de CTC também apresentaram baixa variação à exceção dos valores obtidos no solo rizosférico da fonte $N-NH_4$, aos 10 dias, que foram estatisticamente superiores aos dos demais tratamentos.

TABELA 29 - EFEITO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE N SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS, 10 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Fração do solo	Tratamentos			
		Testemunha	Uréia	NO ₃	NH ₄
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4,17a ¹	4,22a	4,14a	4,16a
	Rizosférico	4,17ab	4,35a	4,16ab	4,04b
K (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	0,13a	0,11a	0,11a	0,12a
	Rizosférico	0,12a	0,16a	0,15a	0,17a
Ca (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	0,58b	0,60b	1,07a	1,02a
	Rizosférico	0,57b	0,69b	1,64a	1,02ab
Ca+Mg (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	2,03a	1,26a	1,87a	1,99a
	Rizosférico	1,68a	1,84a	2,35a	1,89a
Al (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	2,12a	2,25a	1,72a	2,25a
	Rizosférico	1,97ab	1,76ab	1,59b	2,64a
H+Al (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	6,25a	5,82a	5,98a	6,88a
	Rizosférico	6,72b	5,72b	6,26b	8,85a
Mg (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	1,45a	0,66a	0,80a	0,97a
	Rizosférico	1,11a	1,15a	0,72a	0,87a
H (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	4,13a	3,56a	4,26a	4,62a
	Rizosférico	4,74ab	3,96b	4,67ab	6,20a
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	23,8a	22,7a	26,8a	21,6a
	Rizosférico	23,5a	23,1a	25,21a	22,7a
P(mg/dm ³)	Não rizosférico	1,70a	1,23a	2,27a	1,73a
	Rizosférico	2,13a	1,40a	3,20a	1,50a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	13,3a	10,7a	11,7a	13,7a
	Rizosférico	25,0a	21,0a	20,7a	28,7a
CTC ² (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	8,42a	7,20a	7,96a	8,99a
	Rizosférico	8,52b	7,72b	8,76ab	10,90a
S ³ (cmol _c /dm ³)	Não rizosférico	2,17a	1,38a	1,98a	2,11a
	Rizosférico	1,80a	2,00a	2,50a	2,06a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

² - CTC = S+H+Al;

³ - S=Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺

TABELA 30 - EFEITO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS, 25 DIAS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Fração do solo	Tratamentos			
		Testemunha	Uréia	NO ₃	NH ₄
pH (CaCl ₂)	Não rizosférico	4,12a ¹	4,17a	4,12a	4,15a
	Rizosférico	4,09a	4,12a	4,19a	4,01a
K (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	0,13a	0,13a	0,11a	0,12a
	Rizosférico	0,10a	0,08a	0,10a	0,10a
Ca (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	0,87 ab	0,78ab	1,07a	0,62b
	Rizosférico	0,75b	0,92b	1,50a	0,58b
Ca+Mg (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	2,00a	1,73a	2,04a	1,61a
	Rizosférico	1,87a	1,90a	2,23a	1,56a
Al (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	2,30ab	1,86b	2,87ab	3,20a
	Rizosférico	2,24b	2,30b	2,69b	3,82a
H+Al (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	7,64a	7,29a	6,53a	6,92a
	Rizosférico	7,39ab	7,40ab	5,89b	8,26a
Mg (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	1,13a	0,95a	0,97a	1,00a
	Rizosférico	1,12a	0,98a	0,73a	0,97a
H (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	5,34a	5,43a	3,66a	3,72a
	Rizosférico	5,14a	5,10a	3,20a	4,44a
M.O. (g/dm ³)	Não rizosférico	21,33a	24,99a	22,71a	23,47a
	Rizosférico	21,22a	20,93a	22,80a	24,21a
P (mg/dm ³)	Não rizosférico	1,93a	1,27a	2,10a	1,87a
	Rizosférico	1,87a	1,63a	1,13a	1,33a
Na (mg/dm ³)	Não rizosférico	11,33a	9,00a	9,33a	10,67a
	Rizosférico	20,00a	11,67a	22,00a	21,67a
CTC ² (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	9,78a	9,15a	8,69a	8,65a
	Rizosférico	9,36a	9,37a	8,22a	9,92a
S ³ (cmol _d /dm ³)	Não rizosférico	2,13a	1,86a	2,15a	1,73a
	Rizosférico	1,97a	1,98a	2,33a	1,66a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

² - CTC = S+H+Al;

³ - S=Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺

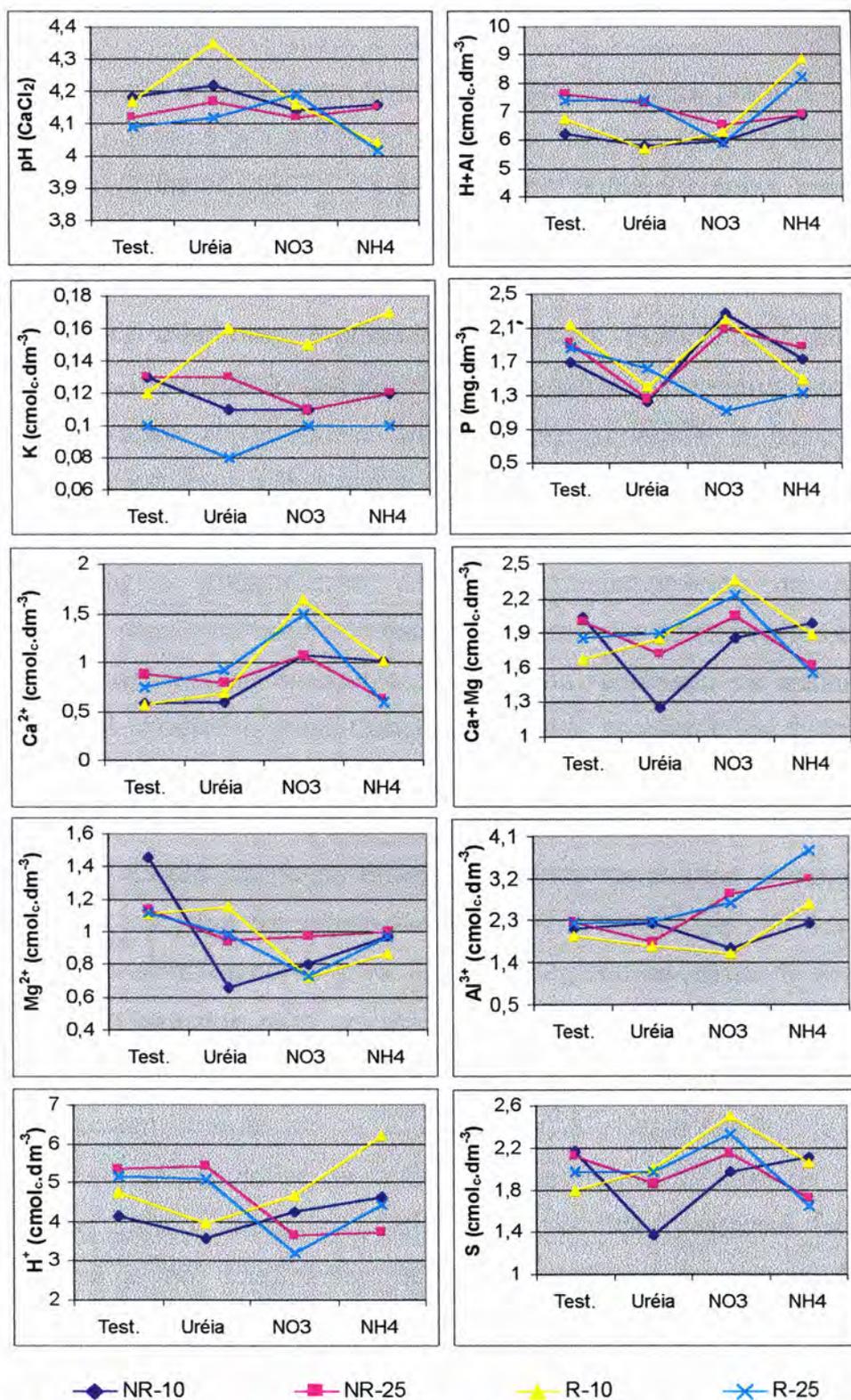


FIGURA 7 - ALTERAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO EM RESPOSTA À UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE N, NAS FRAÇÕES DE SOLO NÃO RIZOSFÉRICO (NR) E RIZOSFÉRICO (R), NAS DUAS AVALIAÇÕES REALIZADAS (10 E 25 DIAS), NO EXPERIMENTO 3.

4.3.4 Fontes de N e Fotossíntese Líquida

A aplicação de diferentes fontes de nitrogênio pode afetar o crescimento das plantas via inúmeros processos ocorrendo no solo, no sistema solo/planta e dentro das plantas (Wiesler, 1997). Porém, mesmo quando plantas crescem de forma similar, tanto com a fonte N-NO₃ quanto à N-NH₄, elas podem diferir em muitos aspectos em relação à sua atividade metabólica e composição iônica, como resultado das diferentes respostas fisiológicas (Kandlbinder *et al.*, 1997). A transferência de nitrogênio das raízes para as folhas ocorre em diferentes formas e a sua incorporação a diferentes aminoácidos, proteínas e outros componentes contendo nitrogênio é diferenciado para cada espécie e fase de desenvolvimento (Pate, 1973). O limite para absorção e assimilação de NO₃ e de NH₄ pode ser primariamente o metabolismo de carbono, dependente da radiação e da fotossíntese, para a formação do esqueleto carbônico de aminoácidos, bem como os próprios metabólitos de nitrogênio, atuando na repressão da assimilação (Harper, 1994). Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações da fotossíntese e da morfogênese de mudas de erva-mate em função da aplicação de diferentes fontes de nitrogênio.

O valor médio diurno de energia atingindo as plantas, durante o período do experimento, na casa de vegetação, foi de 7.7 MJ.m⁻².dia⁻¹. O fluxo de fótons de radiação fotossinteticamente ativa (PPFD) atingindo as folhas de erva-mate nessas condições foi reduzida para um máximo de 800 μmol.m⁻².s⁻¹, próximo ao meio dia (Figura 8), abaixo dos valores que atingem o nível superior das plantas na natureza, os quais podem chegar até a 2200 μmol.m⁻².s⁻¹ nesta região, na mesma época. Apesar disso, as condições de radiação apresentadas na casa de vegetação foram adequadas para o desenvolvimento da erva-mate, conforme os resultados de fotossíntese e de condutância estomática obtidos no campo (Rakocevic, não publicado), onde níveis de radiação maiores que 800 μmol.m⁻².s⁻¹ foram capazes de inibir a fotossíntese das folhas nas extremidades das copas de árvores podadas. A erva-mate caracteriza-se como planta esciófila, aceitando sombra em qualquer idade, tolerando mais luz na fase adulta (Carvalho, 1994). Por outro lado, a razão vermelho/vermelho distante (V:VD) não foi modificada na casa de vegetação em comparação com áreas abertas (Figura 9). Baixas razões V:VD provocam distintas

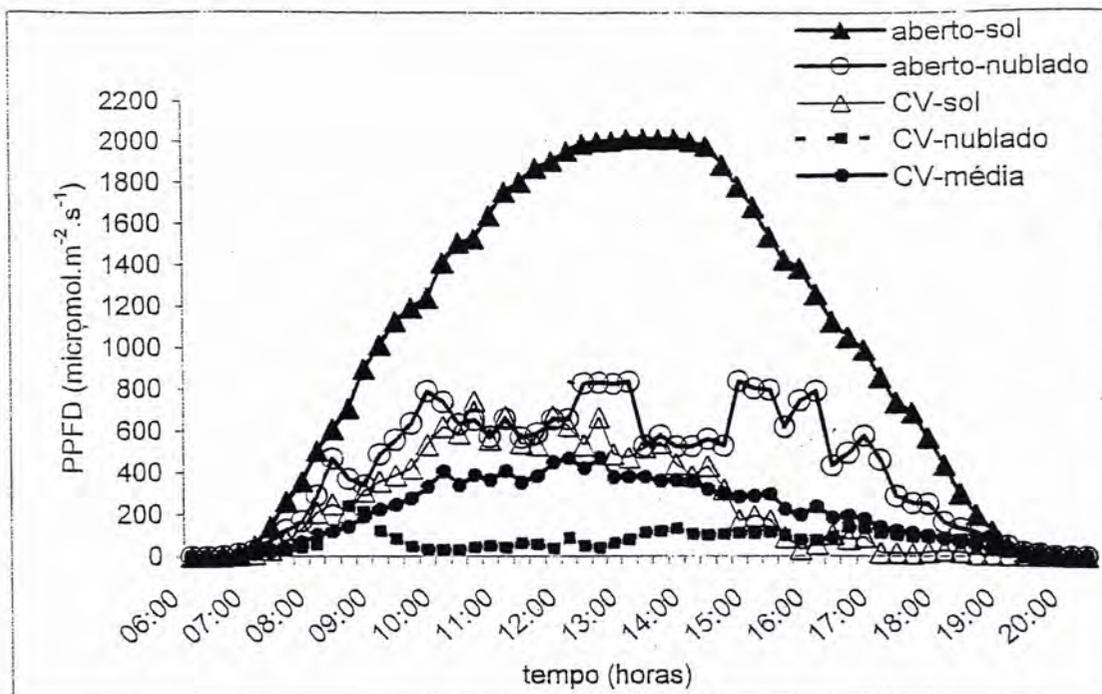


FIGURA 8 - PPFD AO NÍVEL DAS PLANTAS DE ERVA-MATE, REGISTRADO EM CASA DE VEGETAÇÃO DURANTE 9 DIAS, NA ÉPOCA DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO 3.

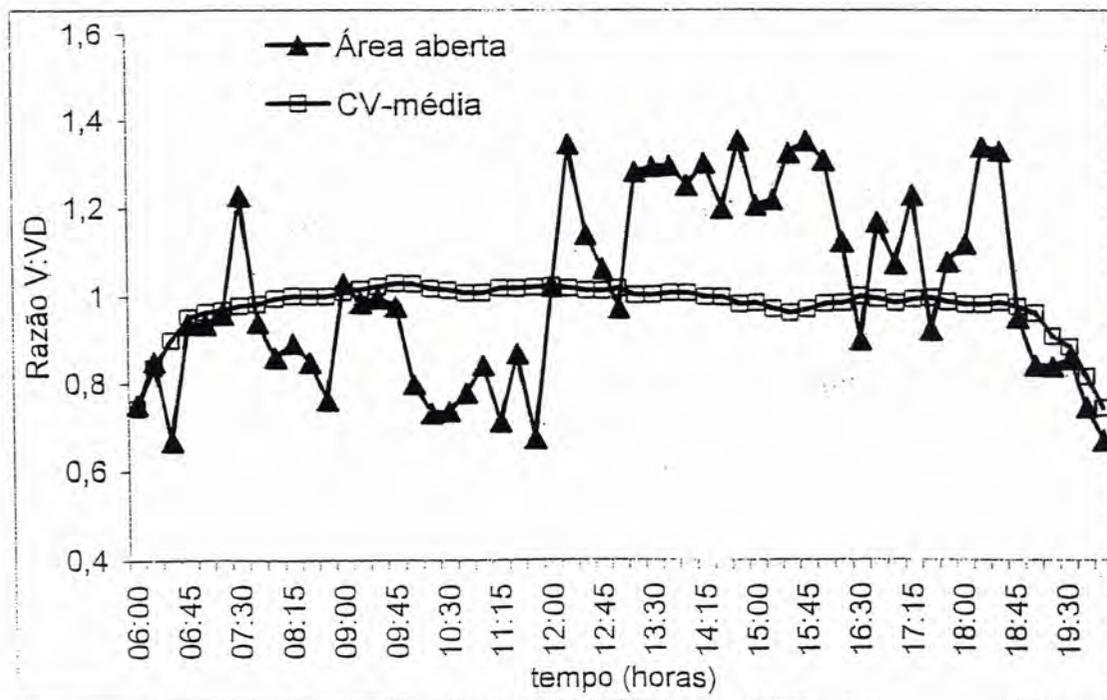


FIGURA 9 - RAZÃO VERMELHO: VERMELHO DISTANTE (V:VD) AO NÍVEL DAS PLANTAS DE ERVA-MATE, REGISTRADA EM CASA DE VEGETAÇÃO DURANTE 9 DIAS, NA ÉPOCA DE EXPERIMENTO 3.

reações fotomorfológicas (Aphalo *et al.*, 1999), dependentes da espécie (Varlet-Grancher *et al.*, 1993)

Plantas nutridas, exclusivamente, com amônio apresentam maior sensibilidade em alta irradiação do que em baixa irradiação (Zornoza *et al.*, 1987). Considerando o PPFD relativamente baixo durante o experimento, a radiação não interferiria negativamente no crescimento da erva-mate. As medições neste experimento foram executadas no início do período de maior resposta anual de fotossíntese líquida da espécie, que ocorre de outubro-novembro até janeiro-fevereiro (Galvão, 1986), destacando tanto as respostas assimilatórias de folhas maduras e novas, quanto as respostas morfológicas, em fase de brotação.

A aplicação de diferentes fontes de nitrogênio afetou de forma distinta o crescimento de mudas de erva-mate (Figuras 10 a 14). Mudas que receberam as fontes N-NH₄ e N-NO₃ apresentaram maior número de folhas 25 dias após a aplicação dos tratamentos, comparativamente à testemunha e às que receberam uréia (Figura 10).

Mudas adubadas com N-NH₄ tiveram ainda uma tendência a favorecer brotações e ramificações laterais. Na última coleta, aos 25 dias, das oito plantas avaliadas por tratamento para a determinação da taxa fotossintética, cinco apresentaram ramificações laterais com a aplicação de N-NH₄, uma com N-NO₃ e nenhuma nos demais tratamentos. Em trigo, também, foi observado um aumento no perfilhamento devido à aplicação de N-NH₄, enquanto em plantas de linho houve uma inibição do perfilhamento devido à aplicação dessa fonte de nitrogênio (Wiesler, 1997). O mesmo autor propôs o modelo de efeito de fonte de nitrogênio na estrutura de produção, explicando aumento de perfilhamento com N-NH₄ através de alteração de crescimento radicial e mudança no balanço hormonal de plantas, com aumento de citoquininas.

A evolução da área foliar (AF) apresentou comportamento distinto em função da aplicação das diferentes fontes de nitrogênio (Figura 11). As mudas não apresentaram diferenças entre tratamentos no início do experimento, antes da aplicação das fontes de nitrogênio, mostrando a homogeneidade fenotípica das mudas de erva-mate usadas. Na primeira avaliação, 10 dias após a aplicação dos tratamentos, a AF de plantas que receberam a fonte uréia foi superior a AF de mudas que receberam as fontes N-NO₃ e N-NH₄, não diferindo da testemunha. A

diferença entre tratamentos deixou de existir no 25º dia, devido a um aumento significativo em AF nos tratamentos N-NH₄ e N-NO₃, o qual é evidenciado na análise

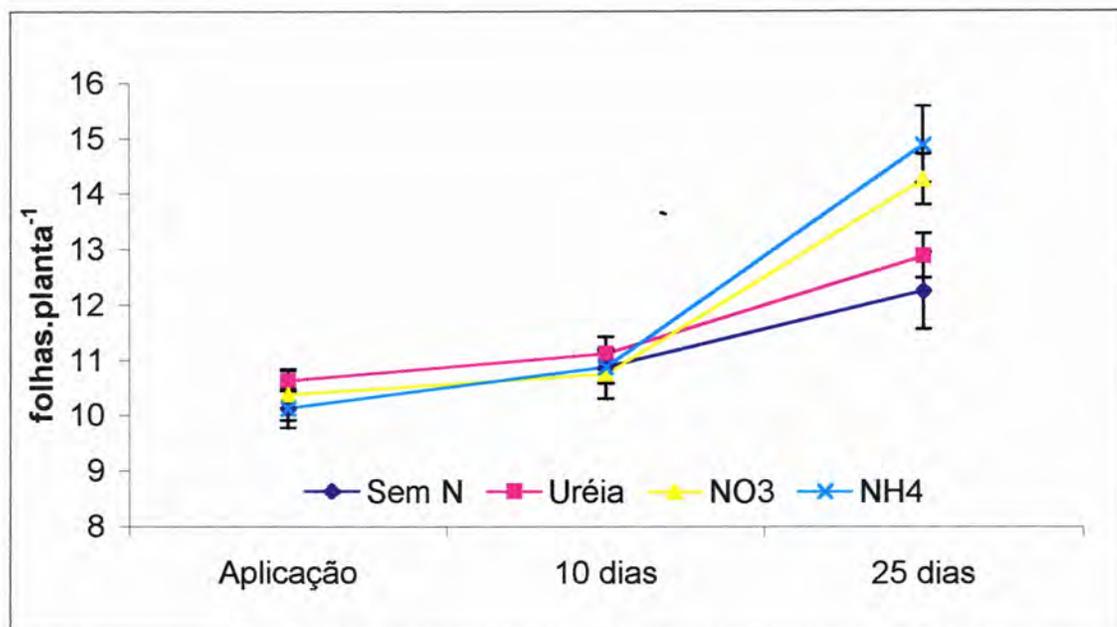


FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE FOLHAS EM MUDAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA FONTE DE NITROGÊNIO, NO EXPERIMENTO 3.

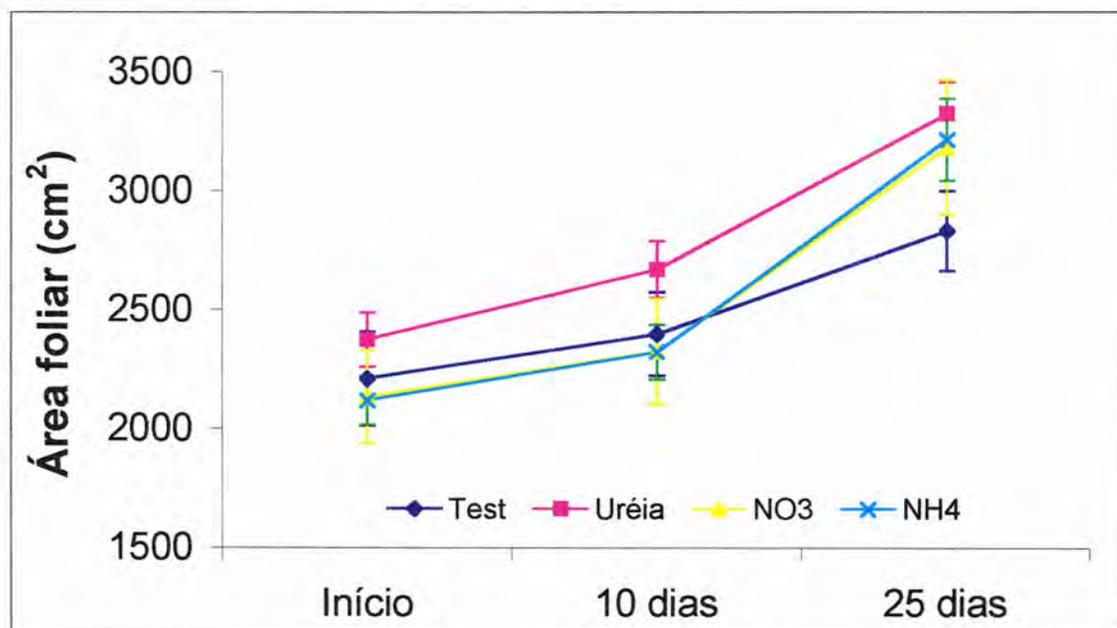


FIGURA 11 - EVOLUÇÃO DA ÁREA FOLIAR (cm².planta⁻¹) EM MUDAS DE ERVA-MATE, DURANTE A CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO 3, EM FUNÇÃO DAS FONTES DE NITROGÊNIO USADAS.

dos ângulos das retas da figura 11, que indicam um incremento mais acentuado naqueles tratamentos do que na testemunha e na uréia. Alguns estudos mostram uma diminuição da superfície das folhas de plantas supridas com N-NH₄ (Lips *et al.*, 1990; Raab & Terry, 1994), embora isto não signifique necessariamente uma diminuição da fotossíntese líquida por unidade de área (Takács & Técsi, 1992).

A emissão de ramificações, número total de folhas e AF, de certa forma são refletidos na evolução da biomassa aérea (Fig.12-A) e no incremento de biomassa aérea e total das mudas (Fig.12-B) entre 10° e 25° dia. O incremento de biomassa nos tratamentos nitrogenados foi sempre superior à testemunha, sendo que uréia e N-NH₄ favoreceram ainda a produção de biomassa radicial. Como conseqüência, a biomassa total foi superior nos tratamentos N-NH₄ e uréia (Figura 12-B).

O aumento no número de folhas novas emitidas a partir da aplicação dos tratamentos nitrogenados não se converteu em ganho de biomassa no tratamento N-NO₃, enquanto para uréia, apesar de manter o número de folhas muito similar à testemunha o ganho de biomassa foi significativo. Outro fator que merece destaque é o grande investimento no sistema radicial de mudas de erva-mate, por parte da testemunha, com um aumento na biomassa radicial superior à aérea (Fig.12-B). Destaque-se ainda que o sistema radicial foi podado previamente ao transplante para os recipientes definitivos, o que forçou todos os tratamentos a investirem na produção de biomassa radicial. Um aspecto que chamou a atenção por ocasião da coleta das mudas foi o tamanho reduzido do sistema radicial em todos os tratamentos. Isto pode estar indicando que o período de estabelecimento das mudas foi muito curto ou que os teores dos nutrientes encontravam-se em quantidades suficientes para o pleno desenvolvimento das mudas, sendo desnecessário um grande investimento no sistema radicial.

Na análise do efeito de diferentes fontes de nitrogênio sobre as características químicas do solo rizosférico, em função do tempo após a aplicação dos tratamentos (Tabela 31), verifica-se que houve uma acidificação do meio na fonte N-NH₄ e uma elevação do pH na fonte uréia, na primeira avaliação após a aplicação dos tratamentos. Observa-se, ainda, que outros parâmetros associados à alteração do pH, como as concentrações de H⁺, H+Al e Al³⁺ apresentam diferenças significativas, especialmente na fonte N-NH₄. Outro fator que se destaca são os valores de cálcio, os quais foram superiores na fonte N-NO₃. Este tratamento

recebeu $\text{Ca}(\text{NO}_3)$ como fonte de nitrato, incorporando assim uma dose de cálcio que não foi recebida pelos demais tratamentos. Em uma visão global do experimento, os resultados obtidos estão de acordo com os dados de literatura, no que se refere às alterações no pH do solo rizosférico e seus parâmetros correlacionados (Marschner, 1995).

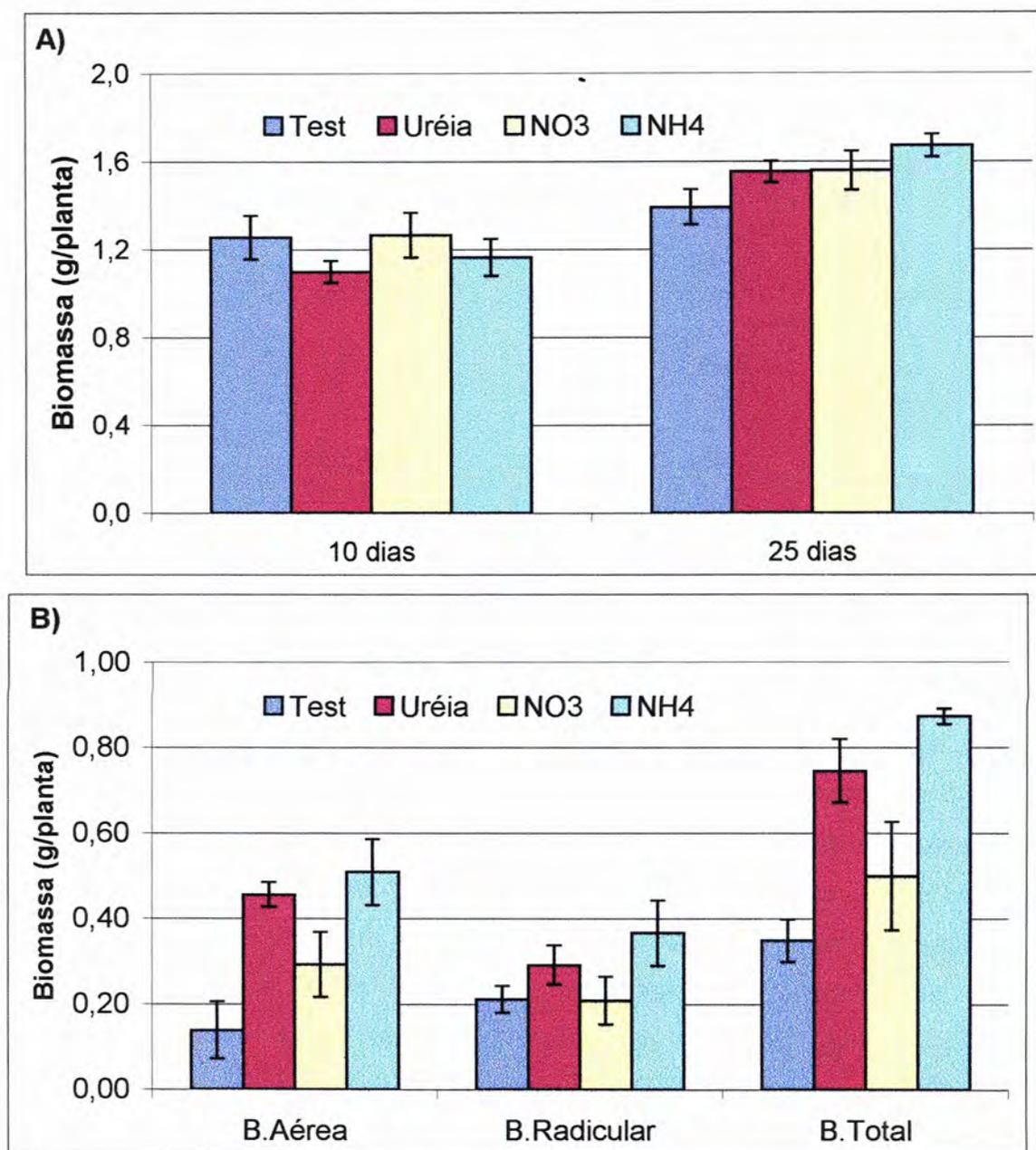


FIGURA 12 - BIOMASSA AÉREA (g/ planta) DE MUDAS DE ERVA-MATE NAS DIFERENTES COLETAS (A) E INCREMENTO DE BIOMASSA (g/planta) ENTRE O 10^o E 25^o DIA (B), NOS COMPARTIMENTOS AÉREO E RADICAL, E NA BIOMASSA TOTAL, EM FUNÇÃO DA FONTE DE NITROGÊNIO, NO EXPERIMENTO 3.

TABELA 31 - EFEITO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO RIZOSFÉRICO, EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Característica	Tempo	Tratamentos			
		Testemunha	Uréia	NO ₃	NH ₄
pH (CaCl ₂)	10 dias	4,17ab	4,35a	4,16ab	4,04b
	25 dias	4,09a	4,12a	4,19a	4,01a
Ca (cmol _c /dm ³)	10 dias	0,57b	0,69b	1,64a	1,02a
	25 dias	0,75b	0,92b	1,50a	0,58b
Ca+Mg (cmol _c /dm ³)	10 dias	1,68a	1,84a	2,35a	1,89a
	25 dias	1,87a	1,90a	2,23a	1,56a
Al (cmol _c /dm ³)	10 dias	1,97ab	1,76ab	1,59b	2,64a
	25 dias	2,24b	2,30b	2,69b	3,82a
H+Al (cmol _c /dm ³)	10 dias	6,72b	5,72b	6,26b	8,85a
	25 dias	7,39ab	7,40ab	5,89b	8,26a
H (cmol _c /dm ³)	10 dias	4,74ab	3,96b	4,67ab	6,20a
	25 dias	5,14a	5,10a	3,20b	4,44ab

¹ - valores seguidos da mesma letra, na linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey

As distintas alterações no solo rizosférico, em função da fonte de nitrogênio aplicada, se refletiram em diferenças na capacidade de absorção dos nutrientes pelas plantas. Os dados apresentados na Tabela 32 evidenciam o maior acúmulo de nitrogênio nos tratamentos que receberam quaisquer das fontes de nitrogênio, em relação à testemunha, com destaque para a fonte N-NH₄. Atenção especial, porém, deve ser dada aos teores de potássio, magnésio, ferro e manganês. Todos esses elementos apresentaram teores mais elevados na fonte N-NH₄, seguido da fonte uréia, e teores bem menores nas fontes N-NO₃ e na testemunha. O potássio está envolvido em processos osmóticos e na abertura e fechamento dos estômatos, além de outros processos na planta (Malavolta *et al.*, 1997), o magnésio é um dos elementos centrais na molécula de clorofila, sendo elemento chave no processo de fotossíntese (Marschner, 1995), o manganês está envolvido diretamente no processo de fotossíntese e na transferência de fosfato, enquanto o ferro atua no metabolismo

basal (reações de oxido-redução), no metabolismo do nitrogênio e na síntese de clorofila (Larcher, 2000). Como se percebe todos esses elementos atuam direta ou indiretamente no processo fotossintético da planta e se percebe que suas concentrações mais elevadas coincidem com as maiores taxas de fotossíntese líquida (Figura 14) observada neste experimento.

TABELA 32 - ACÚMULO DE NUTRIENTES (mg.parcela⁻¹) NA BIOMASSA AÉREA DE MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10^o E 25^o DIA APÓS APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS, NO EXPERIMENTO 3. MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES.

Nutriente	Tratamentos			
	Testemunha	Uréia	NO ₃	NH ₄
N	7,36b ¹	56,39a	58,61a	71,51a
P	-1,08b	-0,09ab	-0,66b	0,71a
K	-1,05b	17,06a	11,95ab	21,58a
Ca	2,83b	6,54b	21,78a	7,01b
Mg	2,95b	6,89ab	3,64b	8,30a
Cu	-0,0008b	0,0200a	0,0037ab	0,0100ab
Fe	0,1563a	0,3320a	0,1383a	0,4079a
Mn	-0,0637a	1,4060a	0,1728a	0,9682a
Zn	-0,0845a	0,1336a	0,0200a	0,1204a

¹ - valores seguidos da mesma letra, dentro da linha, não diferem entre si ao nível de 10% pelo Teste de Tukey.

O conteúdo de nitrogênio nas folhas foi significativamente maior em plantas com a adubação de nitrogenada, sem diferenças entre fontes de nitrogênio (Figura. 13). Comparando-o com a produção da biomassa aérea, pode se concluir que mudas de erva-mate no tratamento com N-NO₃ investe relativamente mais em proteínas de folhas do que os demais tratamentos. Dentro de uma espécie, a capacidade fotossintética é altamente correlacionada com a concentração de nitrogênio nas folhas, devido à grande fração de nitrogênio das folhas alocado no aparato fotossintético (Hikosaka & Hirose, 2000). Déficit de nitrogênio necessariamente provoca a remobilização de nitrogênio a partir da Rubisco (Paul & Foyer, 2001). Assim, quando acontece a diminuição de massa relativa de raízes (testemunha na Figura 12), ela provoca a diminuição de conteúdo de proteínas foliares e assim, a diminuição da fotossíntese pelo nitrogênio (Soussana *et al.*, 2000).

A fotossíntese líquida foi muito similar entre os tratamentos antes da aplicação dos mesmos (início), porém, ocorreu uma forte diferenciação com o passar do tempo

(Figura 14). Plantas de todos os tratamentos nitrogenados apresentaram aumento na fotossíntese líquida depois da aplicação de fertilizantes, tanto nas folhas velhas como nas novas, confirmando os resultados sobre o conteúdo de nitrogênio total.

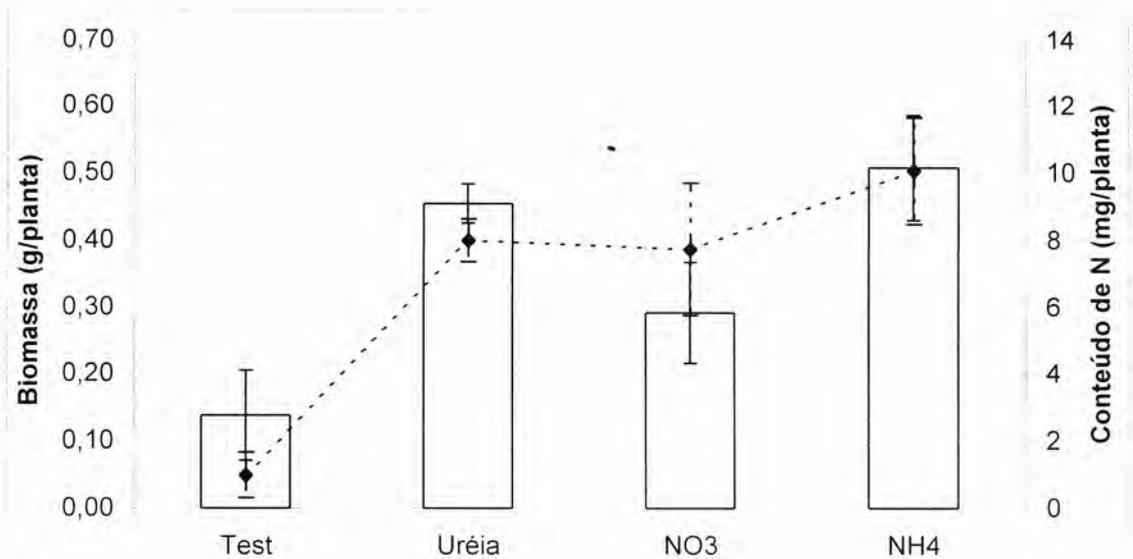


FIGURA 13 - VARIAÇÃO DA BIOMASSA AÉREA (colunas) E DO CONTEÚDO DE N TOTAL (linha) NAS FOLHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, ENTRE O 10^o E O 25^o DIA APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS.

Mudas de erva-mate que receberam a fonte N-NH₄, apresentaram as maiores taxas fotossíntese líquida, tanto nas folhas velhas, como nas novas (Figura 14). As taxas de fotossíntese líquida de folhas novas (emitidas depois da fertilização) superam as taxas registradas nas folhas maduras no 25^o dia, no tratamento N-NH₄. A taxa de fotossíntese líquida foi favorecida pela aplicação de N-NH₄, comparativamente à fonte N-NO₃ e à testemunha (Figura 14). Claussen & Lenz (1999) destacam que a fotossíntese líquida pode diminuir ou aumentar quando plantas são nutridas com nitrogênio amoniacal, dependendo tanto da espécie, como do pH da solução nutriente. Os mesmos autores discutem que plantas de origem de solos ácidos, com alto teor de matéria orgânica, podem aumentar tanto a assimilação líquida, quanto o conteúdo de clorofila com a aplicação de N-NH₄. Seu exemplo foi *Vaccinium corymbosum*, espécie de origem de solos ácidos, que não reage positivamente à correção de solo com CaCO₃. Erva-mate cresce bem mesmo em solos ácidos com pH (CaCl₂) de 3,4 (Lourenço, 1997) e também não respondem positivamente à calagem (Reissmann *et al.*, 1989/1991; Reissmann *et al.*, 1997;

Pintro *et al.*, 1998). A necessidade de macro e micronutrientes desta espécie foi classificada na seguinte ordem decrescente: N > Ca > P > K > Mg > Zn > Cu > Fe (Bellote & Sturion, 1985). Assim, sempre se deve analisar a origem de espécie quando se pretende determinar a forma de adubação.

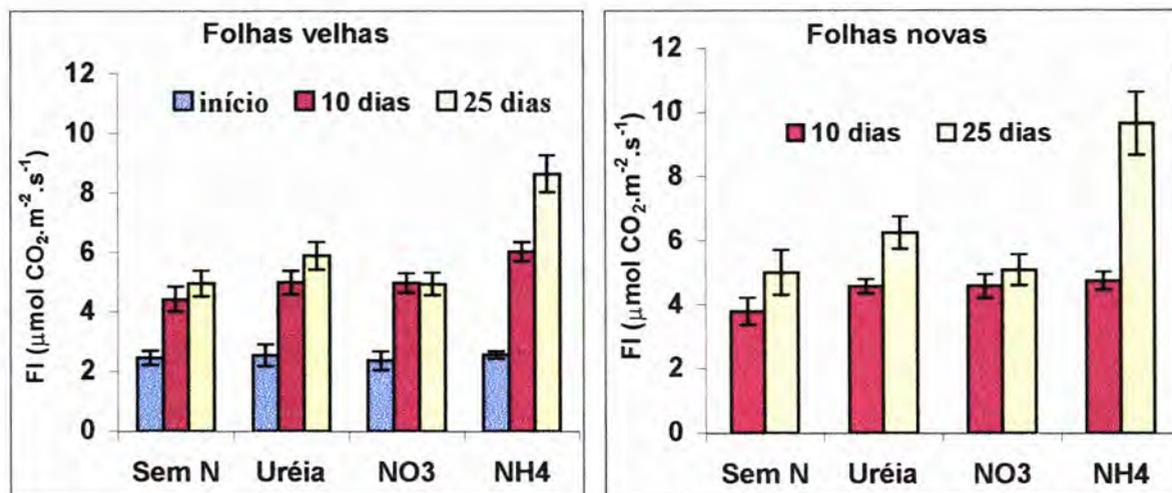


FIGURA 14 - FOTOSÍNTESE LÍQUIDA, EM FOLHAS VELHAS E EM FOLHAS NOVAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE AVALIAÇÃO.

A maioria das espécies que reage positivamente ao N-NH₄ em comparação ao N-NO₃, aumenta a taxa de fotossíntese líquida, diminui a área foliar e investe mais na biomassa radicular, não afetando, porém, a produção de matéria seca total (Wiesler, 1997). A estratégia da erva-mate com a aplicação de diferentes fontes de nitrogênio foi um aumento da fotossíntese líquida (Figura 14), sem alteração da área foliar (Figura 11), investindo mais na biomassa aérea (Figura 12-A) e não afetando a produção da matéria seca total (Figura 12-B).

A alteração do solo usado para o crescimento das mudas se mostrou efetiva em proporcionar uma resposta mais clara dos efeitos de nitrogênio na produção de biomassa, na concentração interna de nutrientes, nas características químicas do solo e na taxa de fotossíntese líquida. No período avaliado, as fontes uréia e N-NH₄ proporcionaram uma taxa mais elevada de fotossíntese líquida, que acabou se refletindo em um ganho maior de biomassa aérea às mudas de erva-mate crescendo com estas fontes de nitrogênio, comparativamente à testemunha e a fonte N-NO₃.

5. CONCLUSÕES

A análise global dos três experimentos permite as seguintes conclusões:

- 1 - A produção de biomassa em mudas de erva-mate, em resposta à adição de diferentes fontes de nitrogênio, é dependente do tipo de solo utilizado. No presente trabalho, alterações significativas na produção de biomassa só foram observadas no LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A proeminente, textura média e relevo ondulado, em função da baixa disponibilidade de nutrientes e do baixo poder tampão deste solo.
- 2 - O aumento na concentração de nitrogênio nas folhas, decorrente da adição das fontes nitrogenadas não é condição suficiente para promover ganho significativo de biomassa nas mudas de erva-mate crescendo em CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A proeminente, textura argilosa, relevo ondulado, substrato Formação Argilitos e Arcósios, devido à elevada disponibilidade de nutrientes neste solo.
- 3 - Embora a tendência de acidificação da fração rizosférica do solo pela fonte N-NH₄ tenha se evidenciado mais claramente no LATOSSOLO VERMELHO, as pequenas variações em pH, juntamente com as características associadas, como acidez ativa, H⁺ e Al³⁺ indicam que a mesma tendência ocorre no CAMBISSOLO HÁPLICO.
- 4 - Os elevados teores de sódio na fração rizosférica do solo, sem diferenças entre as diversas situações testadas, indicam tratar-se de característica da espécie, sendo que possíveis interações com K⁺ devem ser investigadas.
- 5 - O aumento na absorção de K⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ e Mn²⁺, observado no uso da fonte N-NH₄⁺, corresponde a um aumento da área foliar e da taxa de fotossíntese líquida, em LATOSSOLO VERMELHO.
- 6 - Na dose de nitrogênio testada neste trabalho, mudas de erva-mate nutridas com a fonte N-NH₄, apresentam melhor desenvolvimento geral do que nos demais tratamentos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A grande variabilidade genética da erva-mate, associada à diversidade pedológica na ampla área de ocorrência e cultivo da espécie, e as inúmeras práticas silviculturais usadas no manejo da mesma, têm levado a resultados contraditórios nos estudos envolvendo sua nutrição. Enquanto alguns estudos mostram haver *aumentos lineares na produção de massa verde com a elevação das concentrações de nitrogênio*, em outras situações estas respostas não ocorrem ou não são consistentes. O mesmo é verdadeiro para os demais elementos. Assim, o entendimento dos mecanismos envolvidos na absorção desses nutrientes e do seu metabolismo na planta pode contribuir na tomada de decisão sobre a necessidade de adubação e caso seja necessário, sobre a forma mais adequada de executá-la.

Erva-mate é adaptada a solos com baixa disponibilidade de nutrientes, elevados teores de Al^{3+} e baixos valores de pH, além de não responder positivamente à correção do solo com calagem, o que confere à espécie características especiais. Assim, as respostas a diferentes fontes de nitrogênio, em termos de produção de biomassa, composição química foliar, alterações no solo e alteração da fotossíntese líquida, variaram dentro de um mesmo tipo de solo, em função da forma de aplicação dos nutrientes e entre tipos de solo.

O CAMBISSOLO HÁPLICO Tb, Distrófico típico, A proeminente, textura argilosa (CH), usado nos dois primeiros experimentos, apresentou elevados teores de matéria orgânica, níveis adequados de P, Ca^{2+} e Mg^{2+} , baixos teores de Al^{3+} e valores de pH ($CaCl_2$) em torno de cinco. No primeiro experimento, onde as fontes de nitrogênio foram adicionadas na forma de solução nutritiva contendo todos os macronutrientes, em quantidades suficientes para o pleno desenvolvimento das plantas, houve uma resposta positiva em termos de incremento de biomassa, especialmente nas folhas novas, nos tratamentos que receberam uma das duas fontes de nitrogênio. Este incremento em biomassa coincidiu com um aumento no conteúdo de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas novas, com a aplicação das duas fontes de nitrogênio, em relação à testemunha. Apesar disto, à exceção dos teores de H^+ e $H+Al$ que sofreram um aumento significativo na fonte $N-NH_4^+$, tanto a fração rizosférica como a não rizosférica do solo não apresentaram alterações significativas em suas características químicas.

No segundo experimento, onde foi adicionada somente uma solução de equilíbrio contendo o equivalente a 60 mg $P_2O_5.kg^{-1}$ de terra fina seca ao ar (TFSA) e 40 mg $K_2O.kg^{-1}$ de TFSA para todos os tratamentos, as diferenças observadas na produção de biomassa e em sua composição química não foram significativas. Por outro lado, embora não tenha havido diferenças entre as características químicas do solo entre tratamentos, houve diferença significativa entre as duas frações do solo em relação a $Ca+Mg$ nas fontes uréia e $N-NH_4$, a Mg^{2+} e Al_3^+ na fonte $N-NO_3$, nos valores de Saturação de Bases em todos os tratamentos nitrogenados, e especialmente em relação a Na^+ em todos os tratamentos. Os teores de sódio no solo chamam a atenção pela concentração na fração rizosférica ser o dobro da observada na fração não rizosférica e pela alta tolerância da espécie ao elemento, sendo que no primeiro experimento os níveis na rizosfera chegaram a mais de 170 $mg.dm^{-3}$ sem afetar o desenvolvimento das mudas.

O terceiro experimento foi instalado em um LATOSSOLO VERMELHO, Distrófico típico, A proeminente, textura média (LV) que apresentava: baixos teores de matéria orgânica, baixos níveis de P, Ca^{2+} e Mg^{2+} ; altos teores de Al^{3+} ; e valor de pH ($CaCl_2$) em torno de quatro. Neste tipo de solo, mesmo tendo sido aplicado somente a solução de equilíbrio, como no segundo experimento, as fontes $N-NH_4$ e Uréia apresentaram produção de biomassa aérea e total superiores à testemunha. A fonte $N-NO_3$ não diferiu da testemunha nem dos demais tratamentos nitrogenados. Este acúmulo de biomassa coincidiu com aumento no conteúdo de N, P, K e Mg, especialmente na fonte $N-NH_4$, além de um acréscimo nos conteúdos de Cu, Fe, Mn e Zn, embora não tenha havido diferença estatística entre os tratamentos. O solo rizosférico apresentou uma acidificação, bem como um aumento na concentração do Al^{3+} e $H+Al$ no tratamento $N-NH_4$. Neste experimento, foi determinada ainda a taxa de fotossíntese líquida, sendo que as fontes $N-NH_4$ e uréia apresentaram taxas mais elevadas que a testemunha.

Assim, enquanto a fonte $N-NH_4$ parece favorecer o desenvolvimento de mudas de erva-mate, comparativamente à testemunha e à $N-NO_3$ em LATOSSOLO VERMELHO, a mesma tendência não é tão evidente em CAMBISSOLO HÁPLICO. Portanto, estudos deste tipo devem ser expandidos para outros tipos de solos e levados a campo para comprovar o comportamento observado em casa de vegetação.

REFERÊNCIAS

- APHALO, P.J.; BALLARÉ, L.C.; SCOPEL, A.L. Plant-plant signaling, the shade avoidance response and competition. **Journal of Experimental Botany**, v.50, p.1629-1634, 1999.
- BAUER, G.A.; BERNTSON, G.M. Ammonium and nitrate acquisition by plants in response to elevated CO₂ concentration: the roles of root physiology and architecture. **Tree Physiology**, Victoria, v.21, p.137-144, 2001.
- BELLOTE, A.F.J.; STURION, J.A. Deficiências minerais em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) - Resultados preliminares. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS, X (Silvicultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil)), 1985, Curitiba, **Anais...Curitiba: EMBRAPA-CNPFF**, 1985. p.124-127.
- BELTRANO, J.; RONCO, M.G.; BARREIRO R.; MONTALDI, E.R. Plant architecture of *Paspalum vaginatum* Schwartz modified by nitrate and ammonium nutrition. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.7, p.1159-1166, 1999.
- BLOOM A. J. Nitrogen as a limiting factor: Crop acquisition of ammonium and nitrate. In **Ecology in Agriculture**, L. E. Jackson, Academic Press, San Diego, p.145-172.1997.
- CÂMARA SETORIAL DA CADEIA PRODUTIVA DA ERVA-MATE. Produtos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia produtiva da erva-mate. Curitiba, 2000. 160p. (Série PADCT, 1).
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras: Recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília. EMBRAPA SPI/CNPFF.1994. 639p.
- CHEN, Y.L.; HAN, S.J.; ZHOU, C.J.; ZHOU, Y.M.; YU, X. The pH change in rhizosphere of *Pinus koraiensis* seedlings as affected by different nitrogen sources and its effect on phosphorus availability. **Journal of Forestry Research**, Tokyo, v.12, n.4, p. 247-249, 2001.
- CHEN, Y.L.; HAN, S.J.; ZHOU, Y.M. The rhizosphere pH change of *Pinus koreiensis* seedlings as affected by N sources of different levels and its effect on the availability

and uptake of Fe, Mn, Cu and Zn. **Journal of Forestry Research**, Tokyo, v.13, n.1, p.37-40, 2002.

CLARKSON, D.T.; HANSON, J.B. The mineral nutrition of higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.31, p.239-298, 1980.

CLAUSSEN, W.; LENZ, F. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry. **Plant and Soil**, The Hauge, v.208, p.95-102, 1999.

CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.; Reunião Técnica do Cone Sul sobre a Cultura da Erva-Mate, 2., 1997, Curitiba. **Anais...Colombo**. EMBRAPA-CNPF, 1997.464p. (Serie Documentos nº33).

COX, W.J.; REISENAUER, H.M. Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate, or ammonium, or both. **Plant and Soil**, The Hauge, v.38, p.363-380, 1973.

DA CROCE, D.M.; NADAL, R. de Viabilidade técnico-econômica de sistemas de produção de erva-mate consorciada com culturas anuais. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECONOMIA E PLANEJAMENTO FLORESTAL, 2., **Anais**. Colombo: EMBRAPA-CNPF, 1992. v.1, p.329-336.

DIEFFENBACH, A.; MATZNER, E. *In situ* soil solution chemistry in the rhizosphere of mature Norway spruce (*Pecea abies* [L.]Karst.) trees. **Plant and Soil**, The Hauge, v.222, p.149-161, 2000.

DINKELAKER, B.; HAHN, G.; MARSCHNER, H. Non-destructive methods for demonstrating chemical changes in the rhizosphere. II. Application of methods. **Plant and Soil**, The Hauge, v.155-156, p.71-74, 1993.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNCLS, 1979.

ENGELS, C.; MARSCHNER, H. Influence of the form of nitrogen supply on root uptake and translocation of cations in the xylem exudates of maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, London, v.44, p.1695-1701, 1993.

ERICSSON, T. Growth and shoot:root ratio of seedlings in relation to nutrient availability. **Plant and Soil**, The Hauge, v.168-169, p.205-214, 1995.

- FARQUHAR G. D., VON CAEMMERER S., BERRY J. A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta**, v.149, p.78-90, 1980.
- FORDE, B.G.; CLARKSON, D.T. Nitrate and ammonium nutrition of plants: Physiological and Molecular Perspectives. **Advances in Biological Research**, v.30, p.1-90, 1999.
- FOSSATI, L.C.; REISSMANN, C.B. Avaliação do estado nutricional e da produtividade de *Ilex paraguariensis* St. Hil. (erva-mate), em função do sitio. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.; REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE, 2., 1997, Curitiba. **Anais...Colombo. EMBRPA-CNPF**, 1997. p.439. (Serie Documentos nº33).
- GAHOONIA, T.S.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. **Plant and Soil**, The Hauge, v.140, p.241:248, 1992.
- GALVÃO, F. **Variação sazonal da fotossíntese líquida e respiração de *Cahrela canjeana* (Vell.) Mart., *Ilex paraguariensis* St. Hil. e *Podocarpus lambretii* Kl. Em função da intensidade luminosa e temperatura.** Curitiba, 1986. Tese (Doutorado). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: na agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, London, v.53, n.370, p. 789-789, 2002.
- GERENDÁS, J.; ZHU, Z.; BENDIXEN, R.; RATCLIFFE, R.G.; SATTELMACHER, B. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. **Z.Pflanzenernähr Bodenk**, Weinheim, v.160, p.239-251, 1997.
- GIJSMAN, A.J. Nitrogen nutrition of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) on strongly acid sandy soil. II. Proton excretion and rhizosphere pH. **Plant and soil**, The Hauge, v.126, n.1, p.161-167, 1990b.
- GIJSMAN, A.J. Rhizosphere pH along different root zones of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) as affected by source of nitrogen. **Plant and soil**, The Hauge, v.124, n.2, p.161-167, 1990a
- GLASS, A.D.M.; BRITTO, D.T.; KAISER, B.N.; KINGHORN, J.R.; KRONZUCKER, J.; KUMAR, A.; OKAMOTO, M.; RAWAT, S.; SIDDIQI, M.Y.; UNKLES, S.E.; VIDMAR,

- J.J. The regulation of nitrate and ammonium transport systems in plants. **Journal of Experimental Botany**, London, v.53, n.370, p.855-864, 2002.
- GREGORY, P.J.; HINSINGER, P. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: an overview. **Plant and Soil**, The Hague, v.211, p.1-9, 1999.
- HARPER, J.E. Nitrogen Metabolism. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PAULSEN, G.M. **Physiology and determination of crop yield**. Madison. 1994. p.285-302.
- HIKOSAKA, K.; HIROSE, T. Photosynthetic nitrogen-use efficiency in evergreen broad-leaved woody species coexisting in a warm-temperate forest. **Tree Physiology**, Victoria, v.20, p.1249-1254, 2000.
- HINSINGER, P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. **Advances in Agronomy**, New York, v.64, p.225-265, 1998.
- HOFFMANN, C.; LADEWIG, E.; CLAASEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus uptake of maize as affected by ammonium and nitrate nitrogen – Measurements and model calculations. **Z.Pflanzenrähr Bodenk**, Weinheim, v.157, p.225-232, 1994.
- HOPPE, M.; KNOPP, E.; MEDRADO, M.J. Erva-mate: diagnóstico e perspectivas de desenvolvimento. In: **Erva-mate: diagnóstico e perspectivas de desenvolvimento**. Venâncio Aires: Prefeitura Municipal, p.7-22. 1996.
- IMSANDE, J.; TOURAINÉ, B. N demand and the regulation of Nitrate Uptake. **Plant Physiology**, Bethesda, v.105, p.3-7, 1994.
- KANDBINDER, A.; CRUZ, C.; KAISER, W.M. Response of primary plant metabolism to the N-source. **Z.Pflanzenrähr Bodenk**, Weinheim, v.160, p.269-274, 1997.
- KNOEPP, J.D.; TURNER, D.P.; TINGEY, D.T. Effects of ammonium and nitrate on nutrient uptake and activity of nitrogen assimilating enzymes in western hemlock. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.59, n.3-4, p.179-191, 1993.
- KONISHI, S.; MIYAMOTO, S.; TAKI, T. Stimulatory effects of aluminum on tea plants grown under low and high phosphorus supply. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.31, p.361-368, 1985.

- KOZLOWSKI, T.T.; KRAMER, P.J.; PALLARDY, S.G. **The physiological ecology of woody plants**. San Diego. Academic Press, Inc. 1991. 657p.
- KRICUM, S.D.P.; BELINGHERI, L.D. Aplicación de nitrógeno en plantaciones de yerba-mate com diferentes densidades. *In*: Winge, H.; Ferreira, A.G.; Mariath, J.E. de A.; Tarasconi, L.C. **ERVA-MATE: BIOLOGIA E CULTURA NO CONE SUL**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS. p.73-80. 1995.
- KRÖMER, S. Respiration during photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 46, p. 45-70, 1995.
- KUMAR, V.; YADAV, D.V.; YADAV, D.S. Effect of nitrogen sources and cooper levels on yeld, nitrogen and Cooper contents of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant and Soil**, The Hauge, v. 126, p 79-83, 1990.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos, RIMA Artes e Textos. 2000. 531 p.
- LAYZELL, D.B. N₂ fixation, NO₃⁻ reduction and NH₄⁺ assimilation. *In*: DENNIS, D.T.; TURPIN, D.H. **Plant physiology, biochemistry and molecular biology**. Essex. Longman-Scientific and Technical. p. 389-406. 1990.
- LEISEN, E.; HÄUSSLING, M.; MARSCHNER, H. Einfluss von Stickstoff-form und -Konzentration und saurer Benebelung auf pH-Veränderungen in der rhizosphäre von fichten (*Picea abies* (L.)Karst.). **Forstwiss. Cbl.** 109, p.275-286. 1990.
- LIPS, S.H.; LEIDI, E.O.; SILBERBUSH, M.; SOORES, M.I.M.; LEWIS, E.M. Physiological aspects of ammonium and nitrate fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.13, p.1271-1289, 1990.
- LOURENÇO, R.S. Adubação da erva-mate. *In*: **CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.**; REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE, 2., 1997, Curitiba. **Anais...**Colombo. EMBRPA-CNPQ, 1997. p.299-315. (Serie Documentos nº33).
- LOURENÇO, R.S.; CURCIO, G.R.; RACHWAL, M.F.G.; MEDRADO, M.J.S. Avaliação de níveis de nitrogênio sobre a produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em Fernandes Pinheiro-PR, em latossolo vermelho-escuro. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, v.34, p.75-98, 1997a.

- LOURENÇO, R.S.; MEDRADO, J.S.; NEIVERTH, D.D. Efeito de níveis de potássio sobre a produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.) em Ivaí-Pr. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.; REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE, 2., 1997, Curitiba. **Anais...** Colombo. EMBRPA-CNPF, 1997b.p.441. (Serie Documentos nº33).
- MAILLARD, P.; GOJON, A.; DELROT, S.; DAUDET, F.A. Transporte du carbone et de l'azote dans la plante: éléments pour une modélisation fonctionnelle. In MAILLARD P., BONHOMME R. **Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales**, I.N.R.A., Paris, p.11-48, 2000.
- MAJDI, H.; PERSSON, H. Effects of ammonium sulphate application on the chemistry of bulk soil, rhizosphere, fine roots and fine root distribution in *Picea abies* (L.) Karst stand. **Plant and Soil**, The Hauge, v.168-169, p.151-160, 1995.
- MALAGOLI, M.; DAL CANAL, A.; QUAGGIOTTI, S.; PEGORARO, P.; BOTTACIN, A. Differences in nitrate and ammonium uptake between Scots pine and European larch. **Plant and Soil**, The Hauge, v.221, p.1-3, 2000.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas**. - São Paulo Ed. Agronômica Ceres, 1980. 253p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. Piracicaba. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1997. 319p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London. Academic Press. 1995. 889p.
- MARSCHNER, H.; ROMHELD, V. Root-induced changes in the availability of micronutrients in the rhizosphere. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plant roots: The hidden half**. 2nd Ed., New York. Marcel Dekker Inc. 1996. p.557-579.
- MARSCHNER, H.; ROMHELD, V. *In vivo* measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: Effect of plant species and nitrogen source. **Z.Pflanzenphysiol**, Stuttgart, v.111, p.241-251, 1983.
- MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V.; HORST, W.J.; MARTIN, P. Root-induced changes in the rhizosphere: importance for the mineral nutrition of plants. **Z.Pflanzenernähr.Bodenk**. Weinheim, v.149, p.441-456, 1986.

MENGEL, K. **Ernährung und stoffwechsel der pflanze**. Stuttgart. Gustav Fischer Verlag. 1984. 436 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 3ed. Bern. International Potash Institute. 1982. 655p.

MELLO, F.A.F.; BRASIL-SOBRINHO, M.O.C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R.I.; COBRA-NETTO, A.; KIEHL, J.C. **Fertilidade do solo**. São Paulo. Livraria Nobel S/A. 1983. 400p.

NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; ANJOS, J.L. Efeito do alumínio em amostras de dois Latossolos sob cerrado sobre o crescimento e a absorção de nutrientes de mudas de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.6, p.17-20, 1982.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa. UFV/DS, 1999. 399p.

NYE, P.H. Changes of pH across the rhizosphere induced by roots. **Plant and Soil**, The Hague, v.61, p.7-26, 1981.

OAKS, A. Efficiency of nitrogen utilization in C₃ and C₄ cereals. **Plant Physiology**, Bethesda, v.106, p.407-414, 1994.

OLIVEIRA, Y.M.M.; ROTTA, E. Área de distribuição natural de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.). In: Seminário Sobre Atualidades E Perspectivas Florestais, X (Silvicultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil)), 1985, Curitiba, **Anais...** Curitiba: EMBRAPA-CNPQ, 1985. p.17-36.

OLYKAN, S.T.; ADAMS, J.A. *Pinus radiata* seedling growth and micronutrient uptake in a sand culture experiment, as affected by the form of nitrogen. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Oxford, v.25, n.1, p.49-60, 1995.

PATE J.S. Uptake, assimilation and transport of nitrogen compounds by plants. **Soil Biol. Biochem**, Oxford, v.5, p.109-119, 1973.

PAUL, M.; FOYER, C.H. (1999) Sink regulation of photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, London, v.52, n.360, p.1383-1400, 1999.

PILBEAM, D.J.; KIRKBY, E.A. Some aspects of the utilization of nitrate and ammonium by plants. In: MENGEL, K.; PILBEAM, D.J. **Nitrogen metabolism of plants**. Oxford. Clarendon Press. p.55-70. 1992.

- PINTRO, J.C.; MATUMOTO-PINTRO, P.T.; SCHWAN-ESTRADA, K.R.F. Crescimento e desenvolvimento de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em solo sob diferentes níveis de fertilidade. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.20, n.3, p.285-289, 1998.
- PLASSARD, C.; MESLEM, M.; SOUCHE, G.; JAILLARD, B. Localization and quantification of net efflux of H^+ along maize roots by combined use of pH-indicator dye videodensitometry and H^+ -selective microeletrodes. **Plant and Soil**, The Hauge, v.211, p.29-39, 1999.
- RAAB, T.K.; TERRY, N. Nitrogen source regulation of growth and photosynthesis in *Beta vulgaris* L.. **Plant Physiology**, Bethesda, v.105, p.1159-1166, 1994.
- RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo. Editora Agronômica Ceres Ltda. 1991.343p.
- REISSMANN, C.B.; KOELER, C.W.; ROCHA, H.O.; HILDEBRAND, E.E. Avaliação da exportação de macronutrientes pela exploração da erva-mate. *In*: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS, X (Silvicultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil)), 1985, Curitiba, **Anais...Curitiba: EMBRAPA-CNPF**, 1985. p.128-139.
- REISSMANN, C.B.; KOELER, C.W.; ROCHA, H.O.; HILDEBRAND, E.E. Níveis foliares e exportação de micronutrientes pela exploração da erva-mate. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v.9, p.103-106, 1987.
- REISSMANN, C.B.; PREVEDELLO, B.M.S.; QUADROS, R.M.B.; RADOMSKI, M.I. Production and foliar N,P,K,Ca and Mg levels in erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.) related to increasing base saturation levels. **Arq.Biol.Tecnol.**, Curitiba, v.40, n.1, p.241-249, 1997.
- REISSMANN, C.B.; PREVEDELLO, B.M.S.; TREVISAN, E.; BORN, R.H. Suscetibilidade da erva-mate à clorose induzida pela calagem. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v.11, p.273-278, 1989/1991.
- REISSMANN, C.B.; RADOMSKI, M.I.; QUADROS, R.M.B. Chemical composition of *Ilex paraguariensis* St.Hil. under different management conditions in seven localities of Paraná State. **Brasilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.42, n.2, p.187-194, 1999.

- SCHUBERT, S.; YAN, F. Nitrate and ammonium nutrition of plants: effects on acid/base balance and adaptation of root cell plasmalemma H^+ ATPase. **Z.Pflazenernäha. Bodenk.**, Weinheim, v.160, p.275-281, 1997.
- SCHÖTTELNDREIER, M.; FALKENGREN-GRERUP, U. Plant induced alteration in the rhizosphere and the utilization of soil heterogeneity. **Plant and Soil**, The Hauge, v.209, p.297-309, 1999.
- SMITH, F.W.; JACKSON, W.A.; BERG, P.J. Internal phosphorus flows development of phosphorus stress in *Stylosanthes hamata*. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v.17, p.451-464, 1990.
- SOSA, D. A. Fertilización química. Abonos. Requerimientos nutricionales. In: PRAT KRICUN, 2^o **Curso de Capacitacion en produccion de yerba mate**. Cerro Azul. INTA. 1995, 2^a Ed., p.73-88. 1995.
- SOUSSANA, J.F.; TEYSSONNEYRE, F.; THIERY, J.M. Un modèle dynamique d'allocation base sur l'hypothèse d'une co-limitation de la croissance végétale par les absorptions de lumière et l'azote. In MAILLARD, P.; BONHOMME, R. (eds), **Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales**. I.N.R.A., Paris, France. p. 87-112. 2000.
- STARK, J.M.; HART, S.C. High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forest. **Nature**, London, v.385, p.61-64, 1997.
- STULEN, J.; HERTOOG, J.; JANSEN, K. The influence of atmospheric CO_2 enrichment on allocation patterns of carbon and nitrogen in plants from natural vegetation. In: ABROL, Y.P.; MOHANTY, P.; GOVINDJEE **Photosynthesis: Photoreactions to plant productivity**. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. 1993. p.509-524.
- TAGLIAVINI, M.; MASIA, A.; QUARTIERI, M. Bulk soil pH and rhizosphere pH of peach trees in calcareous and alkaline soils as affected by the form of nitrogen fertilizers. **Plant and Soil**, The Hauge, v.176, n.2, p.263-271, 1995.
- TAKÁCS, E.; TÉCSI, L. Effects of NO_3^-/NH_4^+ ratio on photosynthetic rates, nitrate reductase activity and chloroplast ultrastructure in three cultivars of red pepper (*Capiscum annuum* L.). **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.140, p.298-305, 1992.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil Fertility and Fertilizers**, 5^{ed}. New York, Macmillan Publishing Company. 1993. 634p.

THOMSON, C.J.; MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V. F. Effect of nitrogen fertilizer form on the pH of the bulk soil and rhizosphere, and on the growth, phosphorus, and micronutrient uptake bean. **Journal of Plant Nutrition**, Stuttgart, v.16, p.493-506, 1993.

UNICAMP. Histórico da erva-mate. Disponível em: <http://www.unicamp.br/nipe/rbma/erv_his.htm. Acesso em 20 mar. 2003.

VALLE, F.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; SANT'ANA, R. Efeito de alumínio sobre a cinética de absorção de amônio e nitrato em raízes intactas de *Eucalyptus alba*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.8, p.123-132, 1984.

VARLET-GRANCHER, C.; MOULIA, B.; SINOQUET, H.; SUSSEL, G. Spectral modification of light within plant canopies: how to quantify its effects on the architecture of the plant stand. VARLET-GRANCHER C, BONHOMME R, SINOQUET H (eds), **Crop structure and light microclimate: characterization and application**. I.N.R.A., Paris, France. 1993. p.427-451

WICKRAMASINGHE, K.N.; RODGERS, G.A.; JENKINSON, D.S. Transformation of nitrogen fertilizers in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.17, p. 625-630, 1985.

WIESLER, F. Agronomical and physiological aspects of ammonium and nitrate nutrition of plants. **Z. Pflanzenernähr. Bodenk.**, Weinheim, v.160, p 227-238, 1997.

WISNIEWSKI, C.; CURCIO, G.R. Exportação de biomassa e macronutrientes com a primeira poda de formação da erva-mate em cordões vegetados na região de Irati-PR. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.; REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE, 2., 1997, Curitiba. **Anais...Colombo**. EMBRPA-CNPQ, 1997. p.458. (Serie Documentos nº33).

WISNIEWSKI, C.; CLARO, A. M.; MERLIN, P.E.B.; PEREZ, J. Exportação de biomassa e nutrientes com a segunda poda de formação da erva-mate no primeiro Planalto Paranaense. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.; REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE, 2., 1997, Curitiba. **Anais...Colombo**. EMBRPA-CNPQ, 1997. p.459. (Serie Documentos nº33).

- WISNIEWSKI, C.; JINZENJI, F.; CLARO, A. M.; SOUZA, R. M. Exportação de biomassa e macronutrientes com a primeira poda de formação da erva-mate na região de Pinhais-PR. **Revista do Setor de Ciências Agrária**, Curitiba, v.15, p.179-186, 1996.
- ZAMPIER, A.C. **Avaliação dos níveis de nutrientes, cafeína e taninos em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.) após adubação, e sua relação com a produtividade**. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 103 f.
- ZECH, W.; ALT, H.G.; HAUMAIER, L.; BLASEK, R. Characterization of phosphorus fractions in mountain soils of the Bavarian alps by ^{32}P -NMR spectroscopy. **Z. Pflanzenernähr. Bodenk.**, Weinheim, v.150, p.119-123. 1987.
- ZHANG, X.; RANGEL, Z. Gradients of pH, ammonium, and phosphorus between the fertilizer band and wheat roots. **Aust. J. Agric. Research**, Victoria, v.50, p.365-373, 1999.
- ZORNOZA, P.; CARPENA, O.; NAJERA, A.; PENALOSA, J. Effect of light intensity on NH_4 tolerance in tomato plants. **Plant and Soil**, The Hauge, v.102, p.93-97, 1987.
- ZOYSA, A.K.N.; LOGANTHAN, P.; HEDLEY, J. Effect of forms of nitrogen supply on mobilization of phosphorus from phosphate rock and acidification in the rhizosphere of tea. **Australian Journal of Soil Research.**, Victoria, v.36, p.373-387, 1998.

ANEXOS

ANEXO 1 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS DE BIOMASSA DE MUDAS DE ERVA-MATE DO EXPERIMENTO 1

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
F. Velha	2	0,056678	6	0,045556	1,24	0,353177
F.Nova	2	0,346033	6	0,023722	14,59	0,004964
Caule	2	0,047633	6	0,008722	5,46	0,044573
B.aérea (A)	2	0,877211	6	0,144322	6,08	0,036089
Raiz (R)	2	0,049544	6	0,234344	0,21	0,815218
Razão R/A	2	0,021811	6	0,006789	3,21	0,112592
B.total	2	1,338478	6	0,704489	1,90	0,229506

ANEXO 2 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NO CAULE DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 1

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
N	2	17,11690	6	0,691533	24,75	0,001263
P	2	0,007233	6	0,008322	0,87	0,466138
K	2	0,374478	6	0,185667	2,02	0,213820
Ca	2	0,290533	6	0,504289	0,58	0,590372
Mg	2	0,195478	6	0,048511	4,03	0,077729
Cu	2	8,111111	6	0,222222	36,50	0,000438
Fe	2	7304,111	6	3154,000	2,32	0,179743
Mn	2	162,3333	6	91,55556	1,77	0,248298
Zn	2	28,77778	6	72,55556	0,40	0,688999

ANEXO 3 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NAS FOLHAS VELHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 1

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
N	2	33,48103	6	0,576056	58,12	0,000118
P	2	0,139678	6	0,002200	63,49	0,000092
K	2	5,460545	6	0,276967	19,71	0,002304
Ca	2	1,051011	6	0,069989	15,02	0,004617
Mg	2	2,083900	6	1,230700	1,69	0,261179
Cu	2	0,777778	6	0,111111	7,00	0,027000
Fe	2	843,1111	6	147,5556	5,71	0,040807
Mn	2	3144,333	6	7597,889	0,41	0,678630
Zn	2	30,77778	6	18,44444	1,67	0,265328

ANEXO 4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NAS FOLHAS NOVAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 1

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
N	2	109,9982	6	2,696622	40,79	0,000322
P	2	0,000144	6	0,036100	0,00	0,996009
K	2	8,280578	6	1,509556	5,48	0,044192
Ca	2	0,205378	6	0,182056	1,13	0,383806
Mg	2	0,248811	6	0,149556	1,66	0,266183
Cu	2	3,111111	6	1,111111	2,80	0,138382
Fe	2	840,4445	6	80,44444	10,45	0,011103
Mn	2	1312,111	6	569,3333	2,30	0,180882
Zn	2	10,77778	6	13,33333	0,81	0,488831

ANEXO 5 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO, NO EXPERIMENTO 1

	gl	QM	gl	QM	F	Nível de p
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		
pH						
Trat. (T)	2	0,009689	12	0,016417	0,59	0,569536
Solo (S)	1	0,003756			0,23	0,641037
TxS	2	0,000356			0,02	0,978613
K						
Trat. (T)	2	0,000017	12	0,000239	0,07	0,932986
Solo (S)	1	0,000450			1,88	0,195020
TxS	2	0,000050			0,21	0,814049
Ca						
Trat. (T)	2	1,220217	12	2,774528	0,44	0,654148
Solo (S)	1	1,748450			0,63	0,442705
TxS	2	1,236517			0,44	0,650579
Ca + Mg						
Trat. (T)	2	6,281355	12	3,864000	1,62	0,237279
Solo (S)	1	3,546672			0,92	0,356939
12	2	2,651289			0,67	0,522216
Al						
Trat. (T)	2	0,026467	12	0,032856	0,80	0,469602
Solo (S)	1	0,001422			0,04	0,838675
TxS	2	0,052689			1,60	0,241420
H + Al						
Trat. (T)	2	3,017739	12	0,144300	20,91	0,000123
Solo (S)	1	0,035556			0,25	0,628589
TxS	2	0,329072			2,28	0,144736
Mg						
Trat. (T)	2	2,296772	12	1,335672	1,72	0,220471
Solo (S)	1	0,314689			0,23	0,636141
TxS	2	0,775339			0,58	0,574592
H						
Trat. (T)	2	2,935539	12	0,153072	19,18	0,000183
Solo (S)	1	0,022756			0,15	0,706568
TxS	2	0,401406			2,62	0,113543
MO						
Trat. (T)	2	205,8753	12	75,85698	2,72	0,106562
Solo (S)	1	66,8939			0,88	0,366216
TxS	2	88,8053			1,17	0,343195
P						
Trat. (T)	2	1,177222	12	0,926667	1,27	0,315910
Solo (S)	1	1,175556			1,27	0,282053
TxS	2	0,467222			0,50	0,616234
Na						
Trat. (T)	2	113,167	12	62,05556	1,82	0,203449
Solo (S)	1	5618,000			90,53	0,000001
TxS	2	108,500			1,75	0,215588
Soma de Bases						
Trat. (T)	2	6,263906	12	3,882483	1,61	0,239576
Solo (S)	1	3,627022			0,93	0,352850
TxS	2	2,634606			0,68	0,525775
CTC						
Trat. (T)	2	17,35514	12	4,187528	4,14	0,042808
Solo (S)	1	2,94436			0,70	0,418126
TxS	2	3,51624			0,84	0,455709

ANEXO 6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS DE BIOMASSA DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
Folha Velha						
Trat (T)	3	0,004190	16	0,045296	0,09	0,963104
Coleta (C)	1	0,020167			0,44	0,514117
TxC	3	0,005568			0,12	0,945217
Folha Nova						
Trat (T)	3	0,008313	16	0,027292	0,30	0,821653
Coleta (C)	1	0,284770			10,43	0,005235
TxC	3	0,002628			0,10	0,960969
Caule						
Trat (T)	3	0,000504	16	0,010185	0,05	0,984883
Coleta (C)	1	0,054286			5,33	0,034648
TxC	3	0,000939			0,09	0,963281
Raízes						
Trat (T)	3	0,005345	16	0,052079	0,10	0,957330
Coleta (C)	1	0,330009			6,34	0,022865
TxC	3	0,013274			0,25	0,856724
Biomassa Aérea						
Trat (T)	3	0,001487	16	0,186928	0,01	0,998983
Coleta (C)	1	0,825634			4,42	0,051779
TxC	3	0,002571			0,01	0,997702
Razão Raiz / Parte Aérea						
Trat (T)	3	0,003945	16	0,002770	1,42	0,272432
Coleta (C)	1	0,009525			3,44	0,082208
TxC	3	0,007262			2,62	0,086334

ANEXO 7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NO CAULE DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2

	gl	QM	gl	QM	F	Nível de p
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		
N						
Trat. (T)	3	37,06036	16	2,655971	13,95	0,000099
Coleta (C)	1	17,95740			6,76	0,019332
T x C	3	3,97094			1,49	0,253814
P						
Trat. (T)	3	0,021960	16	0,278742	0,08	0,970583
Coleta (C)	1	0,392704			1,41	0,252573
TxC	3	0,050415			0,18	0,907819
K						
Trat. (T)	3	5,066071	16	3,348033	1,51	0,249283
Coleta (C)	1	3,337604			1,00	0,332927
TxC	3	2,067071			0,62	0,613741
Ca						
Trat. (T)	3	4,610238	16	0,825442	5,58	0,008132
Coleta (C)	1	0,015504			0,02	0,892701
TxC	3	0,393371			0,48	0,703011
Mg						
Trat. (T)	3	0,208749	16	0,113208	1,84	0,179868
Coleta (C)	1	0,000204			0,00	0,966652
TxC	3	0,097004			0,86	0,483379
Cu						
Trat. (T)	3	88,5556	16	40,95833	2,16	0,132428
Coleta (C)	1	266,6667			6,51	0,021334
TxC	3	46,5556			1,14	0,364149
Fe						
Trat. (T)	3	1927,72	16	5323,833	0,36	0,781221
Coleta (C)	1	12060,17			2,26	0,151784
TxC	3	2927,72			0,55	0,655409
Mn						
Trat. (T)	3	92,66666	16	12,25000	7,56	0,002268
Coleta (C)	1	0,00000			0,00	1,000000
TxC	3	3,77778			0,31	0,818986
Zn						
Trat. (T)	3	1206,819	16	836,5417	1,44	0,267489
Coleta (C)	1	2109,375			2,52	0,131864
TxC	3	213,042			0,25	0,856873

ANEXO 8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NAS FOLHAS VELHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
N						
Trat. (T)	3	15,02512	16	4,022188	3,73	0,032940
Coleta (C)	1	4,20844			1,05	0,321577
TxC	3	1,18454			0,29	0,828794
P						
Trat. (T)	3	1,499993	16	0,983633	1,52	0,246366
Coleta (C)	1	0,095004			0,10	0,759979
TxC	3	0,128993			0,13	0,940145
K						
Trat. (T)	3	3,730182	16	3,200083	1,17	0,353612
Coleta (C)	1	0,478837			0,15	0,703983
TxC	3	0,815215			0,25	0,856818
Ca						
Trat. (T)	3	3,543783	16	0,187617	18,89	0,000017
Coleta (C)	1	0,851267			4,54	0,049033
TxC	3	0,922900			4,92	0,013112
Mg						
Trat. (T)	3	0,749700	16	0,454100	1,65	0,217394
Coleta (C)	1	0,004817			0,01	0,919250
TxC	3	0,536694			1,18	0,347848
Cu						
Trat. (T)	3	40,26389	16	58,62500	0,69	0,573120
Coleta (C)	1	92,04166			1,57	0,228209
TxC	3	40,70833			0,69	0,568823
Fe						
Trat. (T)	3	2301,333	16	998,5000	2,30	0,115744
Coleta (C)	1	486,000			0,49	0,495404
TxC	3	4928,667			4,94	0,012949
Mn						
Trat. (T)	3	1565,82	16	11288,79	0,14	0,935392
Coleta (C)	1	32340,04			2,86	0,109915
TxC	3	12658,93			1,12	0,369831
Zn						
Trat. (T)	3	108,0417	16	125,7083	0,86	0,482114
Coleta (C)	1	51,0417			0,41	0,533003
TxC	3	201,4861			1,60	0,228012

ANEXO 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NAS FOLHAS NOVAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 2

	gl	QM	gl	QM	F	Nível de p
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		
N						
Trat. (T)	3	76,09865	16	18,20150	4,18	0,023022
Coleta (C)	1	59,50351			3,27	0,089428
TxC	3	29,90333			1,64	0,219132
P						
Trat. (T)	3	0,100582	16	0,181354	0,55	0,652446
Coleta (C)	1	0,061004			0,34	0,570004
TxC	3	0,087693			0,48	0,698381
K						
Trat. (T)	3	5,576949	16	4,298934	1,30	0,309565
Coleta (C)	1	5,292204			1,23	0,283601
TxC	3	5,037771			1,17	0,351394
Ca						
Trat. (T)	3	6,359128	16	0,326229	19,49	0,000014
Coleta (C)	1	4,083750			12,52	0,002734
TxC	3	0,199261			0,61	0,617722
Mg						
Trat. (T)	3	0,103711	16	0,341013	0,30	0,821996
Coleta (C)	1	1,960817			5,75	0,029040
TxC	3	0,064861			0,19	0,901519
Cu						
Trat. (T)	3	73,6667	16	25,45833	2,89	0,067612
Coleta (C)	1	988,1667			38,81	0,000012
TxC	3	154,2778			6,06	0,005877
Fe						
Trat. (T)	3	925,56	16	2111,500	0,44	0,728657
Coleta (C)	1	27744,00			13,14	0,002277
TxC	3	1812,89			0,86	0,482544
Mn						
Trat. (T)	3	328,264	16	903,0000	0,36	0,780220
Coleta (C)	1	3775,042			4,18	0,057705
TxC	3	387,708			0,43	0,734761
Zn						
Trat. (T)	3	56,6111	16	50,95833	1,11	0,373765
Coleta (C)	1	600,0000			11,77	0,003426
TxC	3	13,5556			0,27	0,848894

ANEXO 10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO NO EXPERIMENTO 2

						Continua
	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
pH						
Trat (T)	3	0,013941	32	0,014827	0,94	0,432693
Coleta (C)	1	0,111169			7,50	0,010007
Solo (S)	1	0,502252			33,87	0,000002
TxC	3	0,021547			1,45	0,245772
TxS	3	0,049241			3,32	0,032007
CxS	1	0,002852			0,19	0,663910
TxCxS	3	0,007252			0,49	0,692292
K						
Trat (T)	3	0,001103	32	0,000369	2,99	0,045433
Coleta (C)	1	0,000208			0,56	0,457757
Solo (S)	1	0,000533			1,45	0,237941
TxC	3	0,000414			1,12	0,354583
TxS	3	0,000317			0,86	0,472445
CxS	1	0,000133			0,36	0,551865
TxCxS	3	0,000739			2,00	0,133212
Ca						
Trat (T)	3	1,38503	32	0,139038	9,96	0,000086
Coleta (C)	1	0,03308			0,24	0,629063
Solo (S)	1	12,56653			90,38	0,000000
TxC	3	0,07126			0,51	0,676556
TxS	3	0,26867			1,93	0,144188
CxS	1	0,29453			2,12	0,155282
TxCxS	3	0,11893			0,85	0,474168
Ca + Mg						
Trat (T)	3	4,38491	32	0,182213	24,06	0,000000
Coleta (C)	1	0,24941			1,37	0,250662
Solo (S)	1	54,10253			296,92	0,000000
TxC	3	0,05056			0,28	0,841219
TxS	3	1,60141			8,79	0,000214
CxS	1	0,02613			0,14	0,707403
TxCxS	3	0,01076			0,06	0,980843
Mg						
Trat (T)	3	1,53486	32	0,134475	11,41	0,000030
Coleta (C)	1	0,46413			3,45	0,072419
Solo (S)	1	14,52000			107,97	0,000000
TxC	3	0,05213			0,39	0,762649
TxS	3	1,11135			8,26	0,000326
CxS	1	0,14520			1,08	0,306541
TxCxS	3	0,05987			0,44	0,722335
Al						
Trat (T)	3	0,226535	32	0,035677	6,35	0,001679
Coleta (C)	1	0,225502			6,32	0,017159
Solo (S)	1	2,087502			58,51	0,000000
TxC	3	0,039369			1,10	0,362044
TxS	3	0,124169			3,48	0,027087
CxS	1	0,021252			0,59	0,445894
TxCxS	3	0,025785			0,72	0,545844

ANEXO 10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO NO EXPERIMENTO 2

	QM		QM		Conclusão	
	gl Efeito	Efeito	gl Erro	Erro	F	Nível de p
H + Al						
Trat (T)	3	4,05763	32	1,048475	3,87	0,018109
Coleta (C)	1	0,01650			0,02	0,900948
Solo (S)	1	26,21085			25,00	0,000020
TxC	3	0,44542			0,42	0,736512
TxS	3	9,97311			9,51	0,000122
CxS	1	0,00585			0,01	0,940911
TxCxS	3	0,91629			0,87	0,464811
MO						
Trat (T)	3	163,0331	32	154,0096	1,06	0,380322
Coleta (C)	1	3,0150			0,02	0,889602
Solo (S)	1	62,2213			0,40	0,529546
TxC	3	164,8419			1,07	0,375458
TxS	3	644,8530			4,19	0,013127
CxS	1	70,6888			0,46	0,502966
TxCxS	3	56,3447			0,36	0,778100
P						
Trat (T)	3	6,1100	32	11,40125	0,53	0,661039
Coleta (C)	1	4,4408			0,39	0,536984
Solo (S)	1	156,2408			13,70	0,000803
TxC	3	6,2942			0,55	0,650457
TxS	3	1,1297			0,10	0,959944
CxS	1	0,8533			0,07	0,786166
TxCxS	3	8,3400			0,73	0,546351
Na						
Trat (T)	3	6,139	32	7,791667	0,79	0,509581
Coleta (C)	1	3,000			0,38	0,539320
Solo (S)	1	1518,750			194,92	0,000000
TxC	3	2,167			0,28	0,840788
TxS	3	6,583			0,84	0,479506
CxS	1	1,333			0,17	0,681875
TxCxS	3	2,722			0,35	0,789835
Soma de Bases						
Trat (T)	3	4,46420	32	0,181281	24,62	0,000000
Coleta (C)	1	0,26403			1,45	0,236336
Solo (S)	1	53,76333			296,57	0,000000
TxC	3	0,04464			0,24	0,863364
TxS	3	1,59526			8,80	0,000212
CxS	1	0,02253			0,12	0,726728
TxCxS	3	0,01619			0,09	0,965404
CTC						
Trat (T)	3	8,52032	32	1,276883	6,67	0,001260
Coleta (C)	1	0,41255			0,32	0,573722
Solo (S)	1	4,89602			3,83	0,058979
TxC	3	0,65818			0,51	0,674589
TxS	3	18,16687			14,23	0,000005
CxS	1	0,00542			0,00	0,948465
TxCxS	3	0,90149			0,71	0,555493

ANEXO 11 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS DE BIOMASSA DE MUDAS DE ERVA-MATE DO EXPERIMENTO 3

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
FOLHA VELHA						
Trat. (T)	3	0,003266	16	0,009179	0,36	0,785655
Coleta (C)	1	0,018519			2,02	0,174696
T x C	3	0,018184			1,98	0,157493
Folha Nova						
Trat. (T)	3	0,002745	16	0,001385	1,98	0,157433
Coleta (C)	1	0,238669			172,29	0,000000
T x C	3	0,000762			0,55	0,655308
Caule						
Trat. (T)	3	0,003061	16	0,001901	1,61	0,226311
Coleta (C)	1	0,052111			27,42	0,000082
T x C	3	0,002691			1,42	0,274687
Raiz						
Trat. (T)	3	0,003371	16	0,009832	0,34	0,794687
Coleta (C)	1	0,432017			43,94	0,000006
T x C	3	0,008454			0,86	0,481921
Biomassa Aérea						
Trat. (T)	3	0,016279	16	0,018524	0,88	0,472810
Coleta (C)	1	0,727436			39,27	0,000011
T x C	3	0,042261			2,28	0,118315
Biomassa Total						
Trat. (T)	3	0,025111	16	0,045511	0,55	0,654246
Coleta (C)	1	2,280639			50,11	0,000003
T x C	3	0,084266			1,85	0,178534

ANEXO 12 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NO CAULE DE
MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 3

	gl	QM	gl	QM	F	Nível de p
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		
N						
Trat. (T)	3	50,13446	16	0,390896	128,26	0,000000
Coleta (C)	1	6,39634			16,36	0,000939
T x C	3	2,10148			5,38	0,009420
P						
Trat. (T)	3	0,012049	16	0,002975	4,05	0,025541
Coleta (C)	1	0,495937			166,70	0,000000
T x C	3	0,000404			0,14	0,937191
K						
Trat. (T)	3	6,348895	16	0,477717	13,29	0,000130
Coleta (C)	1	0,326667			0,68	0,420440
T x C	3	0,940744			1,97	0,159280
Ca						
Trat. (T)	3	22,74488	16	0,275912	82,44	0,000000
Coleta (C)	1	4,24200			15,37	0,001219
T x C	3	3,71642			13,47	0,000121
Mg						
Trat. (T)	3	0,104250	16	0,064163	1,62	0,223099
Coleta (C)	1	0,112067			1,75	0,204890
T x C	3	0,105344			1,64	0,219363
Cu						
Trat. (T)	3	3,04167	16	1,625000	1,87	0,175054
Coleta (C)	1	18,37500			11,3	0,003960
T x C	3	0,48611			0,30	0,825514
Fe						
Trat. (T)	3	1053,931	16	323,3750	3,26	0,049136
Coleta (C)	1	4732,042			14,63	0,001491
T x C	3	997,931			3,09	0,057080
Mn						
Trat. (T)	3	1587,042	16	492,9583	3,22	0,050844
Coleta (C)	1	1683,375			3,41	0,083184
T x C	3	1354,375			2,75	0,077056
Zn						
Trat. (T)	3	63,264	16	262,7917	0,24	0,866641
Coleta (C)	1	2223,375			8,46	0,010254
T x C	3	79,708			0,30	0,822570

ANEXO 13 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NAS FOLHAS VELHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 3

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
N						
Trat. (T)	3	16,06816	16	1,044662	150,38	0,000057
Coleta (C)	1	0,12615			0,12	0,732744
T x C	3	0,85925			0,82	0,500397
P						
Trat. (T)	3	0,002793	16	0,004021	0,69	0,568676
Coleta (C)	1	0,238004			59,19	0,000001
T x C	3	0,003526			0,88	0,473645
K						
Trat. (T)	3	0,63027	16	0,466717	10,35	0,293431
Coleta (C)	1	140,50815			31,09	0,000042
T x C	3	0,17753			0,38	0,768476
Ca						
Trat. (T)	3	8,425637	16	0,172450	48,86	0,000000
Coleta (C)	1	0,310537			1,80	0,198358
T x C	3	0,545849			3,17	0,053279
Mg						
Trat. (T)	3	0,080582	16	0,041083	1,96	0,160487
Coleta (C)	1	0,049504			1,20	0,288576
T x C	3	0,007604			0,19	0,904976
Cu						
Trat. (T)	3	1,222222	16	1,291667	0,95	0,441641
Coleta (C)	1	0,000000			0,00	1,000000
T x C	3	3,000000			2,32	0,113830
Fe						
Trat. (T)	3	1438,944	16	648,2917	2,22	0,125408
Coleta (C)	1	3174,000			4,90	0,041805
T x C	3	53,444			0,08	0,968630
Mn						
Trat. (T)	3	12347,22	16	8495,958	1,45	0,264645
Coleta (C)	1	5046,00			0,59	0,452134
T x C	3	3711,00			0,44	0,729704
Zn						
Trat. (T)	3	124,819	16	94,87500	1,32	0,303897
Coleta (C)	1	1335,042			14,07	0,001743
T x C	3	26,819			0,28	0,837138

ANEXO 14 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEORES DE NUTRIENTES NAS FOLHAS NOVAS DE MUDAS DE ERVA-MATE, NO EXPERIMENTO 3

	gl	QM	gl	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível de p
N						
Trat. (T)	3	77,03963	16	5,018259	15,35	0,000057
Coleta (C)	1	71,27707			14,20	0,001680
T x C	3	29,86181			5,95	0,006327
P						
Trat. (T)	3	0,012493	16	0,026392	0,47	0,705129
Coleta (C)	1	0,697004			26,41	0,000099
T x C	3	0,013482			0,51	0,680486
K						
Trat. (T)	3	2,93430	16	0,457929	6,41	0,004670
Coleta (C)	1	25,13307			54,88	0,000001
T x C	3	2,28437			5,00	0,012460
Ca						
Trat. (T)	3	11,72278	16	0,147246	79,61	0,000000
Coleta (C)	1	0,00082			0,01	0,941557
T x C	3	0,05304			0,36	0,782540
Mg						
Trat. (T)	3	0,120249	16	0,027267	4,41	0,019254
Coleta (C)	1	0,018704			0,69	0,419721
T x C	3	0,042026			1,54	0,242383
Cu						
Trat. (T)	3	7,16667	16	2,166667	3,31	0,047136
Coleta (C)	1	13,50000			6,23	0,023858
T x C	3	0,27778			0,13	0,941968
Fe						
Trat. (T)	3	117,1528	16	74,91666	1,56	0,237025
Coleta (C)	1	782,0417			10,44	0,005227
T x C	3	122,9306			1,64	0,219568
Mn						
Trat. (T)	3	11828,2	16	8111,167	1,46	0,263337
Coleta (C)	1	296370,4			36,54	0,000017
T x C	3	7449,7			0,92	0,454231
Zn						
Trat. (T)	3	144,500	16	121,8333	1,19	0,346387
Coleta (C)	1	1980,167			16,25	0,000966
T x C	3	43,833			0,36	0,782838

ANEXO 15 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO NO EXPERIMENTO 3

Continua

	gl	QM	gl	QM	F	Nível de p
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		
pH						
Trat (T)	3	0,031372	32	0,006771	4,63	0,008421
Coleta (C)	1	0,033075			4,88	0,034364
Solo (S)	1	0,003008			0,44	0,509828
T x C	3	0,012092			1,79	0,169688
T x S	3	0,019125			2,82	0,054284
C x S	1	0,005633			0,83	0,368516
T x C x S	3	0,006739			1,00	0,407565
K						
Trat (T)	3	0,000225	32	0,000471	0,48	0,699920
Coleta (C)	1	0,007500			15,93	0,000359
Solo (S)	1	0,000033			0,07	0,791888
T x C	3	0,000394			0,84	0,483196
T x S	3	0,001061			2,25	0,101080
C x S	1	0,009075			19,27	0,000116
T x C x S	3	0,000892			1,89	0,150497
Ca						
Trat (T)	3	0,998691	32	0,017579	56,81	0,000000
Coleta (C)	1	0,000752			0,04	0,837446
Solo (S)	1	0,206719			11,76	0,001686
T x C	3	0,276297			15,72	0,000002
T x S	3	0,195397			11,12	0,000037
C x S	1	0,010502			0,60	0,445237
T x C x S	3	0,005380			0,31	0,820813
Ca + Mg						
Trat (T)	3	0,444639	32	0,093225	4,77	0,007371
Coleta (C)	1	0,000300			0,01	0,955115
Solo (S)	1	0,114075			1,22	0,276892
T x C	3	0,200117			2,15	0,113744
T x S	3	0,284203			3,05	0,042708
C x S	1	0,037408			0,40	0,530936
T x C x S	3	0,065969			0,71	0,554549
Mg						
Trat (T)	3	0,336608	32	0,098098	3,43	0,028509
Coleta (C)	1	0,002002			0,02	0,887296
Solo (S)	1	0,013669			0,14	0,711402
T x C	3	0,040558			0,41	0,744480
T x S	3	0,125080			1,28	0,299561
C x S	1	0,008269			0,08	0,773438
T x C x S	3	0,086191			0,88	0,462467
Al						
Trat (T)	3	2,178150	32	0,136769	15,93	0,000002
Coleta (C)	1	4,575675			33,46	0,000002
Solo (S)	1	0,036300			0,27	0,609967
T x C	3	0,902781			6,60	0,001342
T x S	3	0,278272			2,03	0,128736
C x S	1	0,273008			2,00	0,167354
T x C x S	3	0,140725			1,03	0,392871

ANEXO 15 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO NO EXPERIMENTO 3

Continua

	gl	QM	gl	QM	F	Nível de p
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		
H + Al						
Trat (T)	3	5,375324	32	0,550308	9,77	0,000100
Coleta (C)	1	4,398352			8,00	0,008033
Solo (S)	1	1,876252			3,41	0,074091
T x C	3	2,142791			3,89	0,017674
T x S	3	2,152835			3,91	0,017347
C x S	1	0,803419			1,46	0,235793
T x C x S	3	0,184002			0,33	0,800555
H						
Trat (T)	3	1,925874	32	0,548810	3,51	0,026284
Coleta (C)	1	0,001752			0,01	0,955293
Solo (S)	1	1,390602			2,53	0,121260
T x C	3	5,724758			10,43	0,000061
T x S	3	0,900063			1,64	0,199600
C x S	1	2,013102			3,67	0,064437
T x C x S	3	0,003319			0,01	0,999339
MO						
Trat (T)	3	8,07120	32	5,351925	1,51	0,231199
Coleta (C)	1	11,45630			2,141	0,153200
Solo (S)	1	2,56225			0,48	0,493978
T x C	3	15,26131			2,85	0,052733
T x S	3	4,01556			0,75	0,530251
C x S	1	1,69877			0,32	0,577094
T x C x S	3	5,11616			0,96	0,425382
P						
Trat (T)	3	0,810208	32	0,261042	3,10	0,040272
Coleta (C)	1	0,200208			0,77	0,387686
Solo (S)	1	0,151875			0,58	0,451193
T x C	3	0,331875			1,27	0,300793
T x S	3	0,467986			1,79	0,168387
C x S	1	0,421875			1,62	0,212797
T x C x S	3	0,156875			0,60	0,619112
Na						
Trat (T)	3	69,354	32	11,29167	6,14	0,002025
Coleta (C)	1	157,688			13,96	0,000729
Solo (S)	1	1230,188			108,95	0,000000
T x C	3	15,188			1,35	0,277185
T x S	3	21,910			1,94	0,142918
C x S	1	22,688			2,01	0,166009
T x C x S	3	16,743			1,48	0,237808
Soma de Bases						
Trat (T)	3	0,433431	32	0,096400	4,50	0,009642
Coleta (C)	1	0,004800			0,05	0,824843
Solo (S)	1	0,118008			1,22	0,276796
T x C	3	0,205433			2,13	0,115714
T x S	3	0,296497			3,08	0,041492
C x S	1	0,083333			0,86	0,359457
T x C x S	3	0,077122			0,80	0,503047

ANEXO 15 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS
DO SOLO NO EXPERIMENTO 3

	gl	QM	gl	QM	F	Conclusão
	Efeito	Efeito	Erro	Erro		Nível de p
CTC						
Trat (T)	3	4,197169	32	0,699144	6,00	0,002298
Coleta (C)	1	4,112552			5,88	0,021114
Solo (S)	1	2,935352			4,20	0,048734
T x C	3	3,528897			5,05	0,005631
T x S	3	1,747774			2,50	0,077181
C x S	1	1,404252			2,01	0,166080
T x C x S	3	0,125141			0,18	0,909858