

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

TATIELE ANETE BERGAMO FENILLI

**Destino do nitrogênio (^{15}N) do fertilizante
em uma cultura de café**

PIRACICABA

2006

TATIELE ANETE BERGAMO FENILLI

Engenheira Agrônoma

**Destino do nitrogênio (^{15}N) do fertilizante
em uma cultura de café**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear
na Agricultura da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Energia Nuclear na
Agricultura
Orientador: Prof. Dr. Klaus Reichardt
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Ocheuze
Trivelin

PIRACICABA

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Fenilli, Tatiele Anete Bergamo

Destino do nitrogênio (^{15}N) do fertilizante em uma cultura de café / Tatiele Anete Bergamo Fenilli; orientador Klaus Reichardt; co-orientador Paulo Cesar Ocheuze Trivelin.

- - Piracicaba, 2006.

100 f. : fig.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Adubação nitrogenada 2. Cafeicultura 3. Isótopos estáveis
4. Plantas estimulantes. I. Título

CDU 631.452

MINHA HOMENAGEM ESPECIAL

Aos meus pais, Tereza Darci Bergamo Fenilli (in memoriam) e Alirio Donato Giordane Fenilli pelo exemplo de vida e dedicação na minha educação, e a minha irmã Taciana Aline Bergamo Fenilli pela amizade e incentivo constante.

AGRADECIMENTOS

Especialmente ao orientador Prof. Dr. Klaus Reichardt pela orientação dedicada e competente, além da amizade; que contribuiu vastamente não só para a realização desta pesquisa, mas também para o grande estímulo à minha formação profissional e humana.

Ao Prof. Dr. Paulo César Ocheuze Trivelin por ter contribuído com sábias sugestões, enriquecendo dessa maneira, o conteúdo desta tese.

Aos professores Dr. Osny Oliveira Bacchi, Dr. Durval Dourado Neto, Dr. José Albertino Bendassolli e Dr. José Laércio Favarin pela amizade e contribuição com informações relevantes ao trabalho.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) pela oportunidade da realização do curso de Doutorado.

Aos Laboratórios de Física do Solo e Isótopos Estáveis do CENA, pelo apoio e infraestrutura na realização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo do CENA: Adriana, Dudu, Júlio, Luiz Fernando, Renato e Robson, pela colaboração em todos os momentos do curso.

Aos amigos de todas as horas: Anderson (Folha), Carlos (Faro), Henrique, Isabela, Luciana e Virginia pela amizade e valiosas contribuições.

À Fundação de Amparo e Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudo concedida e pelo financiamento da pesquisa.

À Bibliotecária Marília Ribeiro Garcia Henyei pela revisão da formatação geral do texto e do item referências bibliográficas.

Enfim, a todas as pessoas envolvidas na realização desta tese, o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

		Página
LISTA DE FIGURAS		v
LISTA DE TABELAS		viii
RESUMO		x
ABSTRACT		xii
1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	A planta de café: Histórico, Origem e Botânica	3
2.1.1	Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro	4
2.2	Adubação Nitrogenada.....	6
2.2.1	Absorção e acúmulo de N	9
2.2.2	Volatilização de N.....	10
2.2.3	Absorção foliar de amônia volatilizada	13
2.2.4	Lixiviação de N.....	14
2.3	Uso do isótopo estável do nitrogênio (¹⁵ N) em estudos de fertilidade	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	Caracterização do local, da planta, do clima e do solo	18
3.2	Avaliação do nitrogênio na planta (parte aérea e raiz).....	24
3.3	Nitrogênio no solo.....	30
3.4	Nitrogênio Volatilizado	31
3.5	Nitrogênio Lixiviado.....	34
3.6	Absorção foliar do nitrogênio volatilizado	36
3.7	Produtividade do cafeeiro	39
3.8	Análise dos dados de N.....	40
3.9	Balanço Hídrico	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	PRIMEIRO ANO AGRÍCOLA: DAI 0 (1º Set 2003) a DAI 366 (31 Ago 2004)	47
4.1.1	Marcha de absorção do adubo nitrogenado pela parte aérea da cultura	47
4.1.2	Balanço do Nitrogênio	56
4.1.2.1	Volatilização da amônia.....	56

4.1.2.2	Absorção Foliar de amônia volatilizada	61
4.1.2.3	Lixiviação	63
4.1.2.4	Contabilização do N do fertilizante no fim do 1º ano (DAI 0-366).....	64
4.2	SEGUNDO ANO AGRÍCOLA: DAI 366 (1º Set 2004) a DAI 730 (31 Ago 2005)	67
4.2.1	Marcha de absorção do adubo nitrogenado pela parte aérea da cultura	67
4.2.2	Balanço do Nitrogênio	74
4.3	Considerações gerais sobre os dois anos agrícolas	76
4.3.1	Eficiência de utilização do fertilizante.....	76
4.3.2	Produtividade do cafeeiro	77
4.3.3	Distribuição do nitrogênio na raiz.....	79
4.3.4	Compartimento que melhor reflete a planta toda em termos de N total e composição isotópica	81
4.3.5	Considerações sobre os balanços de nitrogênio.....	85
4.3.6	Balanço Hídrico	86
5	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 3.1	Dados climáticos da área experimental durante os anos agrícolas 2003/2004 e 2004/2005 (DAI 0 a 730). (as setas azuis representam os momentos da aplicação do fertilizante marcado, e as setas vermelhas as colheitas).....	21
Figura 3.2	A: Esquema da área experimental com as 16 parcelas numeradas de 1 a 16, indicando as parcelas 2, 3, 5, 6 e 9 de T ₂ onde foi realizado o balanço de N com fertilizante marcado; B: Detalhes de uma parcela com a sub-parcela indicando a localização das plantas que receberam adubo marcado com ¹⁵ N e o instrumental utilizado. ...	22
Figura 3.3	Vista da área experimental em DAI 0 mostrando as 9 linhas de café e a posição das sub-parcelas T ₂ que podem ser observadas através dos tanques de 200 L instalados na parte inferior, para coleta de enxurrada.....	24
Figura 3.4	Esquema dos diferentes compartimentos da planta e do solo.....	26
Figura 3.5	Esquema de amostragem de raiz de café	28
Figura 3.6	Aparelho utilizado para separação de raiz por lavagem	28
Figura 3.7	Espectrômetro de massa ANCA SL utilizado nas avaliações de N% e ¹⁵ N.....	29
Figura 3.8	Ilustração da parcela 16 onde foi instalado o experimento de volatilização de amônia	33
Figura 3.9	Detalhe do coletor semi-aberto-estático utilizado para quantificar a volatilização de amônia do solo.....	33
Figura 3.10	Vista dos extratores de solução do solo a vácuo instalados em cada parcela T ₂ para o cálculo da quantidade de N lixiviada.....	34
Figura 3.11	Esquema do extrator de solução do solo (Reichardt e Timm, 2004)...	35
Figura 3.12	Disposição das bandejas na planta central PC, as plantas vizinhas mais próximas PV _{1,2,3,4} e as plantas vizinhas mais distantes PV _{5,6,7,8} utilizadas para amostragem de folhas.....	38
Figura 3.13	Detalhe das bandejas colocadas abaixo da projeção da copa do cafeeiro	38
Figura 3.14	Vista do pivô central instalado na área do experimento	43
Figura 3.15	Detalhe dos 3 tubos de acesso para sonda de nêutrons instalados até a profundidade de 1,15 m em cada parcela T ₂ com o objetivo de medir a umidade do solo as profundidades de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 m.....	44
Figura 3.16	Ilustração das parcelas T ₂ delimitadas com chapa metálica para medição de escoamento superficial durante o cálculo do balanço hídrico e fechadas com tela metálica para evitar possíveis danos provocados por capivaras.....	46
Figura 3.17	Vista da área experimental no final dos 2 anos de experimento	

	(731 DAI)	46
Figura 4.1	Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos das plantas em todos os períodos estudados do 1º ano agrícola (2003/2004)	48
Figura 4.2	Variação da massa de matéria seca mMS_7 no 1º ano agrícola, com dados observados (pontos) e a estimativa (linha cheia) pela equação (4.1) e taxa de acúmulo (linha pontilhada) da MS (dMS_7/dt) obtida pela derivação da equação (4.1). As setas vermelhas indicam as adubações, e as linhas azuis representam o ponto de taxa máxima de crescimento	50
Figura 4.3	Relação $QNddf_i/QNdds_i$ em todas as épocas estudadas do 1º ano agrícola	56
Figura 4.4A	Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em setembro de 2003	59
Figura 4.4B	Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em novembro de 2003	59
Figura 4.4C	Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em dezembro de 2003	60
Figura 4.4D	Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em fevereiro de 2004	60
Figura 4.5	Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos das plantas em todos os períodos estudados no 2º ano agrícola (2004/2005)	68
Figura 4.6	Variação da massa de matéria seca mMS do compartimento 7 no 2º ano agrícola, iniciando do zero (366 DAI = 0 DAI) para ajuste do modelo. Dados observados (pontos) e a estimativa (linha cheia) pela equação (4.1) e taxa de acúmulo (linha pontilhada) da MS (dMS_7/dt) obtida pela derivação da equação (4.1). As setas vermelhas indicam as adubações, e as linhas azuis representam o ponto de taxa máxima de crescimento	69
Figura 4.7	Relação $QNddf_i/QNdds_i$ em todas as épocas estudadas do 2º ano agrícola	74
Figura 4.8	Evolução da massa de matéria seca (mMS), teor de nitrogênio na parte aérea ($N\%$), enriquecimento isotópico (átomos % em excesso), quantidade do nitrogênio da parte aérea derivada do fertilizante ($QNddf \text{ kg ha}^{-1}$) e recuperação do fertilizante ($R\%$) em função do tempo (DAI). As setas vermelhas indicam as adubações dos 2 anos agrícolas	77
Figura 4.9	Produtividade do cafeeiro em sacas por hectare durante os dois anos agrícolas para os tratamentos T_0 (dose zero), T_1 ($1/2$ dose) e T_2 (dose de 280 kg ha^{-1} no 1º ano e 350 kg ha^{-1} de N no 2º ano agrícola)	79
Figura 4.10	Massa de matéria seca (mMS) de raiz nas diferentes profundidades (0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8, 0,8-1,0 m) e distantes do caule ($A = 0,15 \text{ cm}$, $B = 33 \text{ cm}$, $C = 56 \text{ cm}$ e $D = 87,5 \text{ cm}$) em 366 DAI	80

Figura 4.11	Massa de matéria seca (mMS) de raiz nas diferentes profundidades ((0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8, 0,8-1,0 m) e distantes do caule do cafeeiro (A = 0,15 cm, B = 33 cm, C = 56 cm= e D = 87,5 cm) em 731 DAI	80
Figura 4.12	Regressões lineares entre a média ponderada MP (equação 4.1) e os valores de N-total e ^{15}N nas diversas partes da parte aérea do café, para todas as datas (9) de amostragem.....	84

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 3.1-	Características químicas e físicas da camada 0 - 0,2 m do Nitossolo Vermelho Eutroférico da área experimental	20
Tabela 3.2-	Fases fenológicas do cafeeiro arábica de acordo com Pezzopane et al. (2003) e dados do experimento de acordo com a fenologia do cafeeiro	23
Tabela 3.3-	Condições meteorológicas e estágio de crescimento da planta durante o experimento de absorção de NH ₃ volatilizado.....	37
Tabela 4.1-	Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos da parte aérea da planta nos momentos t iguais a 0, 63, 126, 182 e 243 DAI, referentes ao 1º ano agrícola.....	47
Tabela 4.2-	Teor de N total (C _{Ni}) nos diferentes compartimentos da planta nos momentos 0, 63, 126, 182 e 243 DAI.....	51
Tabela 4.3-	Abundância Isotópica dos diferentes compartimentos da planta nos momentos 0, 63, 126, 182 e 243 DAI.....	52
Tabela 4.4-	Nitrogênio acumulado (NA _i) nas diferentes partes da planta nos momentos 0, 63, 126, 182 e 243 DAI.....	53
Tabela 4.5-	Quantidade de N do fertilizante nas diferentes partes da planta nos períodos 0, 63, 126, 182, 243 DAI	55
Tabela 4.6-	N-NH ₃ volatilizado (kg ha ⁻¹) em função dos fertilizantes aplicados em superfície para uma dose de 70 Kg N ha ⁻¹ e em razão da época de aplicação	58
Tabela 4.7-	Volatilização de N proveniente da uréia e reabsorção foliar do N volatilizado em um período de 6 dias	61
Tabela 4.8-	Contribuição de cada planta no total absorvido (100%) do N volatilizado	62
Tabela 4.9-	Destino do N do fertilizante (QNddf _i) nos diferentes compartimentos e sua recuperação (R%), depois de um ano de cultivo (DAI 366)	65
Tabela 4.10-	Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos da parte aérea da planta nos momentos t iguais a 366, 429, 494, 548 e 636 DAI, referentes ao 2º ano agrícola.....	67
Tabela 4.11-	Teor de N total (C _{Ni}) nos diferentes compartimentos da planta nos momentos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.....	70
Tabela 4.12-	Nitrogênio acumulado (NA _i) nas diferentes partes da planta nos momentos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.....	71
Tabela 4.13-	Abundância Isotópica dos diferentes compartimentos da planta nos momentos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.....	72
Tabela 4.14-	Quantidade de N do fertilizante nas diferentes partes da planta nos períodos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.....	73
Tabela 4.15-	Destino do N do fertilizante nos diferentes compartimentos, depois de dois anos de cultivo (DAI 731).....	75
Tabela 4.16-	Produtividade do cafeeiro nos dois anos agrícolas estudados (2003/2004 e 2004/2005).....	78
Tabela 4.17-	Precipitação (P), irrigação (I), armazenamento inicial (Si), variação do armazenamento de água no solo (ΔS), escoamento	

superficial (RO), drenagem (Q_{Li}) e evapotranspiração real (ERi) e a evapotranspiração potencial ET_c , para todos os períodos analisados. DAI = dias após o início 87

RESUMO

FENILLI, T.A.B. **Destino do nitrogênio (^{15}N) do fertilizante em uma cultura de café.** 2006. 100 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2006.

A cultura do café é um dos mais importantes agronegócios do Brasil e, apesar de suas práticas de manejo já estarem bem definidas, muitos aspectos da cultura ainda carecem esclarecimentos, destacando-se entre eles a nutrição nitrogenada do cafeeiro. Para isso foram conduzidos vários experimentos na cultura do café com adubação nitrogenada para se determinar o balanço do N no sistema solo-café-atmosfera, e melhor compreender a dinâmica do N dentro da planta. Os tratamentos constituíram de 5 sub-parcelas (repetições) com 9 plantas, as três centrais recebendo 280 kg ha^{-1} de N no 1º ano de experimento e 350 kg ha^{-1} de N no 2º ano, na forma de sulfato de amônio enriquecido no ^{15}N , com concentração isotópica igual a 2,072% de átomos de ^{15}N . A massa de matéria seca da parte aérea foi determinada à cada 60 dias, sacrificando uma planta de cada parcela, fora das sub-parcelas de 9 plantas. Nas plantas marcadas isotopicamente amostrou-se, também à cada 60 dias, um ramo contendo todas as partes da planta e nestas foram determinadas as concentrações de ^{15}N e N-total por espectrometria de massa. Raiz e solo também foram amostrados nas camadas 0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8, 0,8-1,0 m apenas no final de cada um dos 2 anos estudados. Nestas amostras também foi determinada a abundância de ^{15}N e N-total por espectrometria de massa. Para quantificar a volatilização de amônia do solo proveniente do fertilizante, foi utilizado o método do coletor de N-NH₃ semi-aberto estático. Para estimar a lixiviação do N para fora do elemento de volume de solo considerado para o balanço de N (0 - 1,0 m) em períodos úmidos,

foram instalados extratores de solução do solo à vácuo (três a 100 cm por parcela) para determinação da concentração de N e da abundância isotópica de ^{15}N por espectrometria de massa. A planta chegou a absorver no primeiro ano de experimento até 71,3% do N do fertilizante, diminuindo seu conteúdo antes da colheita para 42,9% devido à translocação de N para raízes, queda de folhas e frutos, e perdas de N pela parte aérea, mostrando a alta eficiência do sulfato de amônio. No final dos 2 anos estudados, a recuperação do N do sulfato de amônio pela parte aérea das plantas foi de 19,1%. A raiz acumulou 9,4%. No solo o N remanescente foi de 12,6%. A serrapilheira acumulou 11,2% do N aplicado, e portanto, servirá como fonte orgânica de N. A exportação pelos grãos foi relativamente pequena, 26,3%, devido ao cafezal ainda estar em formação. As perdas por lixiviação e volatilização foram pequenas, em torno de 2,3 e 1,6%, respectivamente, sendo que a reabsorção foliar da amônia volatilizada foi de 43,3%. Apenas 18,2% do N aplicado não foram recuperados, tendo sido considerado como N não estimado (perda de N pela parte aérea, raízes abaixo de 1,0 m, erros de amostragem, etc.).

Palavras-chave: cafeeiro, absorção de fertilizante, isótopo estável, volatilização.

ABSTRACT

FENILLI, T.A.B. **The fate of fertilizer nitrogen (^{15}N) in a coffee crop.** 2006. 100 f. Thesis (Doctoral) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2006.

The coffee is one of the most important agribusiness products of Brazil and, although its management practices are already well defined, several cropping aspects still need a deeper understanding. Among these the nutrition of the coffee plant in respect to nitrogen is one of the main subjects needing more clarification. To contribute to this aspect, several experiments were carried out involving fertilizer application to a coffee crop, aiming for the establishment of a N balance in the soil-coffee-atmosphere system and better understand the N dynamics within the plant. Treatments consisted of 5 sub-plots (replicates) of 9 plants, the central three receiving $280 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ during the 1st year and $350 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ in the second. The fertilizer was ^{15}N enriched ammonium sulphate, at a concentration of 2.072% ^{15}N atom excess. Shoot dry matter was monitored every 60 days scarifying one whole plant of each treatment, collected outside the isotopic sub-plots of 9 plants. Isotopically labeled plants were sampled cutting one branch containing all desired plant parts, in order to measure ^{15}N enrichment and total N concentration. Root and soil were sampled only at the end of each year, in the 0-0.2, 0.2-0.4, 0.4-0.6, 0.6-0.8, 0.8-1.0 m layers. To quantify soil volatilization from fertilizer N a semi-open N-NH_3 static collector was used. To estimate N leaching below the root zone, considering the 0-1.0 m soil layer, soil solution N concentration and ^{15}N enrichment were obtained from soil solution extractors data. Shoot fertilizer N absorption reached 71.3% during the first year, with a reduction to 42.9% just before harvest, due to N translocation to roots, leaf and fruit drop, and N losses to the atmosphere, indicating the high efficiency of the application of the ammonium sulphate. At the end of both yearly experimental periods, the recovery of the

fertilizer N by the shoot was 19.1%. Roots accumulated 9.4% and in the soil 12.6% of the fertilizer N were still present. Litter accumulated 11.2% and continues to be an important N source. Bean export was relatively low, well explained for a coffee crop under formation. Leaching and volatilization losses were of the order of 2.3 and 1.6%, respectively, however, reabsorption of volatilized ammonia reached 43.3% of the applied amount. To close the balance after two years, 18.2% of the fertilizer N were not recovered, considered to consist of non evaluated forms of N (shoot losses of NH_3 , roots below 1 m, sampling errors, etc.).

Keywords: coffee plant, fertilizer absorption, stable isotope, volatilization.

1. INTRODUÇÃO

O café é um dos principais produtos agrícolas do mundo, cultivado em diversos continentes e em mais de 50 países, entre os quais se destacam Brasil, Colômbia e Vietnã, responsáveis por cerca de 50 a 60% da produção mundial. No Brasil, ela se destaca entre as mais importantes, apresentando cerca de 3 milhões de hectares, com uma produção de 34 milhões de sacas anuais e geração de divisas da ordem de 680 milhões de dólares anuais (FNP, 2004). Entre os cultivares plantados, cerca de 80 a 85% são da espécie *Coffea arabica* L. e 15 a 20% cultivares da espécie *Coffea canephora* Pierre. Dos cultivares da espécie *C. arabica* L., destacam-se os cultivares Catuaí, encontrado em 50 a 60% das lavouras e o cultivar Mundo Novo em 30 a 35 %, estando o restante dividido entre as cultivares Icatú, Obatã, Catuaí, Iapar 59, Tupi, Bourbon, Acaiá do Cerrado, Rubi, Topázio e outras (FAVARIN, 2004).

A produção brasileira é formada por 80 a 90% de café arábica cultivados nos Estados de Minas Gerais, maior produtor, seguido por São Paulo, Bahia e Paraná. O restante da safra, 10 a 20% é de café conilon e robusta, cultivados no Estado do Espírito Santo, segundo maior produtor onde predomina a cultivar conilon, seguido dos Estados de Rondônia e Mato Grosso com plantio da cultivar robusta (PRADO; NASCIMENTO, 2003).

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura do café, o segundo mais translocado para os grãos, e o mais exportado pelos grãos (CATANI; MORAES, 1958; MALAVOLTA, 1993). Sua importância se deve as funções como constituinte de moléculas de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos e citocromos, além de ser integrante da molécula de clorofila. Este nutriente proporciona os maiores aumentos de rendimento da cultura de café.

As doses de nitrogênio são determinadas com base na produção esperada da cultura e no teor foliar do nutriente, sendo recomendadas aplicações parceladas de até 450 kg ha⁻¹ por ano agrícola, fornecidos no período chuvoso (RAIJ et al., 1996).

Segundo Meirelles et al. (1980) a importância do nitrogênio se destaca principalmente em solos de região de clima tropical úmido, em que há grande mobilidade de nitrogênio e intensa mineralização da matéria orgânica, além do custo dos fertilizantes nitrogenados. Sendo assim, é fundamental o uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, para o qual é necessário o conhecimento dos processos e interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera visando o seu máximo aproveitamento pela planta.

Quando o fertilizante nitrogenado é aplicado, parte do elemento é recuperado pelo sistema radicular e parte aérea, parte permanece no solo, enquanto uma outra porção pode ficar imobilizada no litter ou pode se perder do sistema solo-planta.

Resultados obtidos sob os mais diversos sistemas agrícolas mostraram que raramente uma cultura aproveita mais de 60% do nitrogênio aplicado como fertilizante. O restante pode permanecer no solo, disponível para as culturas subseqüentes ou perder-se por diversos mecanismos tais como a volatilização, desnitrificação, lixiviação para fora da zona radicular e carregado pela erosão.

O uso de isótopo estável, na forma de fertilizante marcado com ¹⁵N, é uma ferramenta apropriada para estudos desta natureza, podendo-se avaliar o destino do fertilizante no sistema solo-planta-atmosfera e, assim, estimar a eficiência da cultura em aproveitá-lo (REICHARDT, 1986). A utilização dessa técnica isotópica em uma cultura perene de grande porte é difícil tanto pela obtenção da taxa de acúmulo de massa de matéria seca total da planta como pela exigência de grande quantidade de fertilizante marcado, o que onera o custo da pesquisa.

O presente trabalho visa preencher uma lacuna de informações sobre a dinâmica do nitrogênio no sistema solo-café-atmosfera, com o objetivo de maximizar o uso do N do fertilizante pela cultura. Neste sentido, os principais objetivos foram:

- Verificar o destino do N derivado do fertilizante aplicado à cultura, dentro do sistema solo-planta-atmosfera com vistas às taxas de absorção, às eficiências de absorção e à redistribuição dentro da planta;

- Estimar as perdas por volatilização, lixiviação e exportação pelos grãos;

- Estimar a reabsorção pela planta do café do N volatilizado;

- Testar a metodologia do uso do ^{15}N como traçador para uma cultura de grande porte, por um período longo (2 anos), com o intuito de indicar procedimentos de amostragem, níveis de enriquecimento e metodologias de análise.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A planta de café: Histórico, Origem e Botânica

A cultura do café originou-se da Etiópia, no século XV, depois percorreu a África, a Europa, a América Central, e, em seguida, a Guiana Francesa (PRADO; NASCIMENTO, 2003). Os primeiros povos que consumiram café foram os árabes em meados do século XV (1440), os quais iniciaram os primeiros cultivos no sul da Arábia, com sementes da Etiópia. Os europeus iniciaram o cultivo a partir de 1690 com os holandeses na Indonésia. O café foi introduzido no Brasil em 1727, na região Norte (Pará), expandindo-se até a Bahia, atingindo o Rio de Janeiro e daí evoluindo para o Espírito Santo e Minas Gerais e para os Estados de São Paulo e Paraná (MATIELLO; CARVALHO, 1981).

O cafeeiro pertence à família Rubiaceae, abrangendo mais de 10 mil espécies e, conforme classificação mais recente elas foram reunidas em dois gêneros: *Psilanthus* Hook e *Coffea* L., os quais diferem basicamente, por particularidades apresentadas nas estruturas florais (FAVARIN, 2004).

Cada gênero subdivide-se em dois subgêneros, o gênero *Psilanthus* se divide nos subgêneros *Psilanthus* e *Afrocoffea*, e o gênero *Coffea* nos subgêneros *Coffea*, representando mais de 80 espécies e *Bararcoffea*, constituído por cerca de sete espécies.

A maioria das espécies do subgênero *Coffea* é oriunda da Ilha de Madagascar, enquanto 25 espécies são nativas da África Continental, com destaque para as espécies *C. arábica* L. e *C. canephora* Pierre.

Existe um grande número de espécies de café, entretanto, somente duas merecem destaque pela importância econômica, as espécies *C. arábica* L. e *C. canephora* Pierre. Estas duas espécies atendem 100% do consumo mundial de café, com a participação do café arábica na formação de “blend” da ordem de 60 a 70% e 30 a 40% para a robusta e conilon (FAVARIN, 2004). As demais espécies possuem importância para o banco de germoplasma, indispensáveis nos programas de melhoramento.

2.1.1 Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro

O cafeeiro é um arbusto de crescimento contínuo, apresenta dimorfismo dos ramos, com ramos ortotrópicos, que crescem verticalmente e ramos plagiotrópicos, que crescem horizontalmente, numa inclinação de 45 a 90° em relação ao eixo principal. Os ramos ortotrópicos e plagiotrópicos originam-se de gemas diferenciadas. As gemas cabeça-de-série, que se formam a partir do 8° ao 10° nó, dão origem a ramos laterais e as gemas seriadas, formada na axila de cada folha, à ramos verticais (ortotrópico, ou ladrões). O sistema

radicular do cafeeiro é constituído de raízes permanentes, axiais, verticais, placa superficial, raízes suporte das raízes absorventes e raízes absorventes (NUTMAN, 1933). O “tipo” de raiz do cafeeiro varia com condições do ambiente. A maior concentração de raízes absorventes é observada entre 30 e 60 cm de profundidade e 50 a 80 cm do tronco (RENA; MAESTRI, 1986).

Em função da interação de fatores genéticos, nutricionais e ambientais, as plantas normalmente crescem em diferentes ritmos durante as diferentes épocas do ano (TAIZ; ZIEGER, 1991; MOHR; SHOPFER, 1995). Cafeeiros em produção ou em fase inicial de desenvolvimento não são diferentes (RENA et al., 1996). Apresentam grande capacidade de adaptação às variações ambientais, mediante modificações de natureza diversa (morfológica, bioquímica e fisiológica) (AKUNDA et al., 1979).

A fase vegetativa das plantas perenes é ininterrupta, variando de intensidade durante o ano em razão da fenologia da planta, força drenagem dos órgãos e das condições ambientais. De maneira geral, as condições favoráveis ao crescimento da parte aérea são temperatura acima de 12,5° C, disponibilidade hídrica e fotoperíodo longo. No inverno o crescimento vegetativo é menor, mesmo não havendo frutos em formação, devido aos efeitos da baixa temperatura e ou a falta de umidade do solo. Nas condições de baixa temperatura no inverno, o cafeeiro apresenta atividade metabólica, somente que a mesma acontece com menor intensidade, variável com o fator térmico (RENA; MAESTRI, 1986; AMARAL, et al., 1987).

O crescimento radicular, da mesma maneira que ocorre com a parte aérea, diminui quando a temperatura do solo aproxima de 13° C (FRANCO, 1965). Entretanto, como na zona radicular a temperatura do solo dificilmente é inferior a esse limite e, freqüentemente é superior a 17° C durante a maior parte do dia, admite-se que as raízes são ativas e que a atividade da reductase do nitrato no inverno é aumentada com o fornecimento de N (AMARAL et al., 1987; AMARAL, 1991). Presume-se que as raízes cresçam, preferencialmente no

outono após a granação dos frutos e continua durante o inverno, quando o crescimento da parte aérea é pequeno e os frutos estão maduros, podendo crescer até a primavera, antes da florada.

A floração é um processo que envolve indução (estímulo), evocação (processo em que as gemas vegetativas mudam para gemas reprodutivas), e antese. A indução ocorre a partir de fevereiro e março, provavelmente quando diminui a taxa de crescimento vegetativo. A antese acontece no início da primavera (setembro) e a principal fonte de energia para os botões vem de carboidratos formados nas folhas (RENA; MAESTRI, 1986)

Os cafeeiros arábicos são plantas autógamas e a polinização ocorre em aproximadamente 90 a 99% das flores antes da antese. No Brasil o pegamento dos frutos em cultivares arábica é da ordem de 50%, independente da carga pendente do cafeeiro. O pegamento é influenciado pelo número de flores, número de folhas por ramo produtivo, presença ou não de flores atrofiadas, chuvas intensas durante expansão do botão floral, nutrição das plantas, queda de temperatura abrupta, espécie e cultivar, e posição da flor na planta (FAVARIN, 2004).

As condições climáticas e nutricionais, além das condições fisiológicas próprias do cafeeiro, são citadas como as causas da bianualidade, que normalmente ocorre a partir do quarto ano. Assim, a planta fica esgotada depois de uma produção elevada, mostrando com isso uma tendência para produzir pouco no ano seguinte (PRADO; NASCIMENTO, 2003).

2.2 Adubação Nitrogenada

Todos nutrientes são necessários ao bom desenvolvimento do cafeeiro, no entanto, a falta de N é a que mais limita seu crescimento e produção, e entre outros aspectos, representa

uma fatia considerável do custo total de produção da cultura (VAAST et al., 1998). O seu uso incorreto é caracterizado pela aplicação de doses muito baixas ou altas a ponto de serem desnecessárias, aplicadas em épocas inadequadas, constituindo-se uma maneira de aumentar as perdas de nitrogênio para o sistema pela baixa eficiência de absorção pelas plantas naquele momento.

As quantidades de N adicionadas às culturas dependem do teor de N mineral que os solo pode proporcionar no período da cultura e, da exigência das culturas. A matéria orgânica (MO) é a principal fonte de N no solo, onde mais de 85% do N encontra-se na forma orgânica, e o teor desta é muito variável e depende do processo de mineralização, que por sua vez é afetada pelo clima (temperatura e umidade), solo (pH, aeração, disponibilidade de nutrientes, relação C/N, etc.), sistema de cultivo, etc., onde a contribuição para as plantas é baixa e muito variável (MALAVOLTA, 1986).

De acordo com a recomendação oficial, as doses de N baseiam-se em função do rendimento esperado e do teor do nutriente na folha, para cafeeiros em produção. São recomendadas doses de até 450 kg ha⁻¹ de N por ano agrícola, fornecidos no período chuvoso, de setembro a março, compreendendo as fases de floração, frutificação e desenvolvimento vegetativo (RENA; MAESTRI, 1987; RAIJ et al., 1996; RIBEIRO et al., 1999). Na literatura existem poucos trabalhos de pesquisa realizados para fundamentar uma recomendação específica de adubação de formação (considerada a partir do primeiro ano após o plantio do cafeeiro, até o quarto ano). Para o Estado de São Paulo, no segundo ano agrícola (primeiro ano após o plantio) recomenda-se aplicações de 8 g de N por cova, com intervalos de 45 dias, no período de setembro à março, junto com a adubação potássica e aplicado em cobertura, em volta das plantas (RAIJ et al., 1996). Malavolta (1996) recomenda 20 g de N por cova e 20 g de K₂O em quatro vezes.

A eficiência da adubação nitrogenada é conhecida apenas indiretamente, por meio da resposta da cultura em termos de produção. Como as doses de nitrogênio aplicadas são altas e realizadas na época das chuvas, pressupõe-se que as perdas sejam significativas. No entanto, a prática da adubação nitrogenada, indispensável para os ganhos significativos de produtividade, resulta em altos custos, merecendo uma atenção da pesquisa voltada para a racionalização do uso desse nutriente.

O melhor aproveitamento dos fertilizantes pelo cafeeiro, principalmente o nitrogênio, está relacionado com o efeito de doses e parcelamentos (MARTINS, 1981; VIANA, 1980) e sobretudo com a época de adubação (KÜPPER, 1976). A absorção de nitrogênio pelo café é intensificada a partir do 4º mês do florescimento, coincidindo com o período de granação e maturação dos frutos (MORAES; CATANI, 1964). Todavia, com relação ao parcelamento, alguns resultados são variáveis em relação ao tipo de solo (VIANA, 1980).

A época portanto, de aplicação dos adubos nitrogenados é determinada em função de dois fatores principais, considerando-se plantas em plena produção: os períodos de maior exigência do cafeeiro, e o comportamento do adubo no solo (MALAVOLTA, 1986). Se levarmos em conta o primeiro item, tais fases seriam: 1. depois da colheita e início da vegetação, e 2. pegamento da florada e crescimento dos frutos, sendo que o parcelamento, principalmente do N, deve ser no mínimo de 3 a 4 vezes, devido à sua dinâmica na planta e no solo, evitando-se as perdas de nitrogênio por lixiviação.

Segundo Malavolta (1993), quando os nutrientes nitrogênio e potássio são aplicados juntos, o efeito é maior do que quando aplicados separadamente, sendo que a adubação de somente um deles terá pouco ou nenhum efeito. Nos solos agrícolas de média a alta fertilidade, a produtividade dos cafezais está relacionada com a presença de níveis adequados de nitrogênio e potássio, especialmente o primeiro.

São citados na literatura resultados contrastantes com relação à resposta do cafeeiro à fertilização com macro e micronutrientes. Na maioria dos casos, observa-se efeito positivo da fertilização com NPK (VIANA et al., 1987; RAIJ et al., 1996; SANZONOWICS et al., 2001). Entretanto, diversos trabalhos têm demonstrado pouca ou nenhuma resposta à aplicação desses nutrientes (GALLO et al., 1999; GARCIA, 1999).

Para Küpper (1976) o nitrogênio deve ser parcelado em 3 doses desiguais visando aplicar doses maiores no período de maior necessidade do cafeeiro. Entretanto Vianna et al., (1985 e 1987) não observaram diferenças na produtividade utilizando parcelamento em doses iguais ou desiguais. É importante salientar que, segundo Moraes et al. (1978), a maior absorção de N ocorre no período chuvoso, com demanda maior pelos frutos aos 150-210 dias após o florescimento (época de maturação).

Por outro lado, Lazzarini e Moraes (1967) obtiveram resultados positivos na produção do cafeeiro com parcelamento da adubação nitrogenada, sem correlação com as necessidades por períodos. Já Moraes et al. (1978), utilizando doses fracionadas, obtiveram resultados positivos com parcelamentos concentrados entre outubro e fevereiro.

2.2.1 Absorção e acúmulo de N

O nitrogênio é um nutriente essencial que, em geral, responde mais rapidamente quando bem utilizado e que produz retornos. A análise das partes constituintes do cafeeiro, especialmente folhas e frutos, revela uma elevada exigência em nitrogênio e potássio, fato esse confirmado em diversos experimentos de campo (MALAVOLTA, 1993). Dados obtidos cultivando o cafeeiro em solução nutritiva, no período que vai da pré-floração até metade do crescimento do fruto, revelam que plantas de café absorvem 60% do nitrogênio total de que acumula no ano agrícola.

A quantidade de nitrogênio mensalmente retida pelo cafeeiro com mais de 3 anos de idade na parte vegetativa nos meses de setembro a junho, é de 3,0 a 3,5 kg ha⁻¹ (de dezembro a março) e ao redor de 2,0 kg ha⁻¹ nos demais meses (KÜPPER, 1976), sendo que nos dois a três meses de menores valores de temperatura média durante o período seco, a retenção de nitrogênio é de aproximadamente 0,5 kg ha⁻¹. Na frutificação, segundo Malavolta (1986), essa fase imobiliza o nitrogênio em ritmo diferente. Na fase do chumbinho, segundo esses autores, o consumo de N é de menos de 0,1 kg mês⁻¹ ha⁻¹ e na fase de granação e maturação é de pouco mais de 0,4 kg ha⁻¹ por saca de café beneficiado de carga pendente. Com esses resultados verifica-se a importância de uma distribuição parcelada do adubo, de maneira que não haja nem excesso e nem falta de N durante todo o período vegetativo e de frutificação. É necessário calcular as quantidades e a época dos parcelamentos para cada região e também para café precoce e tardio.

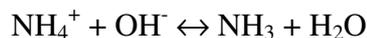
A variação de nutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro desde o início de formação até maturação dos frutos, pode ser quantificada pela extração de nutrientes de frutos, conhecendo-se assim, o ritmo de sua extração. A extração de nutrientes pelos frutos obedece a seguinte ordem decrescente: potássio, nitrogênio, cálcio, magnésio, enxofre, fósforo, manganês, boro, cobre e zinco (CHAVES, 1982).

2.2.2 Volatilização de N

Grande quantidade de N aplicado em superfície pode ser perdido do solo por volatilização. As perdas de NH₃ por volatilização em ecossistemas agrícolas são governadas por fatores de manejo, de solo e de clima. Os fatores de manejo mais importantes são a localização do adubo no solo, as doses do fertilizante utilizadas e a presença ou não de resíduos vegetais sobre a superfície do solo. O N do fertilizante quando aplicado na superfície

do solo é susceptível a perdas por volatilização. Essas perdas podem corresponder até 50% do N aplicado (TERMAN, 1979). Esta perda diminui o valor do fertilizante e contribui para poluição atmosférica, e é favorecida quando se utilizam calcário, doses altas do fertilizante, etc. Em relação à dose do adubo aplicado, tem-se verificado que, na maioria das vezes, maiores doses do adubo resultam em perdas mais elevadas de amônia por volatilização (TRIVELIN et al., 1994). Os efeitos da cobertura do solo sobre a volatilização de amônia apresentam resultados divergentes, sendo que em algumas situações as perdas aumentaram, enquanto que, em outros casos, as perdas com cobertura vegetal não diferiram das do solo descoberto ou foram menores (ANJOS; TEDESCO, 1976). A cobertura vegetal reduz o ritmo de evaporação de água e aumenta a atividade da enzima urease, reduzindo ou aumentando as perdas de amônia por volatilização, respectivamente (CORSI, 1994; SÁ, 1996). Além disso, a baixa capacidade de retenção de NH_3 nos resíduos vegetais seria mais um fator contribuindo para o incremento nas perdas desse gás (FRENEY et al, 1991).

Os fatores de solo mais importantes que influenciam nas perdas de NH_3 por volatilização são o pH, a capacidade de troca catiônica, o poder tampão, os teores de carbonato de cálcio e de matéria orgânica do solo (CORSI, 1994). O pH altera o equilíbrio de NH_4^+ e NH_3 na solução do solo. Aumento no pH, aumenta a concentração relativa de amônia e seu potencial de volatilização (TRIVELIN et al., 1994)



No caso da CTC, quanto maior o seu valor, menor a concentração de NH_4^+ na solução do solo, e portanto, menores perdas de amônia por volatilização.

Diversos fatores ambientais, como a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, podem interferir no processo de volatilização de amônia, entretanto, na maioria dos casos, a

temperatura e a precipitação pluviométrica (quantidade e momento em que ocorrem após a aplicação do fertilizante) são consideradas as principais variáveis ambientais atuando sobre as perdas de NH_3 (LIGTHNER et al., 1990). Aumentos na temperatura podem aumentar as perdas de amônia por volatilização, devido à elevação da proporção de NH_3 na solução do solo em relação a NH_4^+ ; à diminuição da solubilidade da amônia ocorrendo sua difusão; ao aumento na atividade da urease; e ao aumento das taxas de evaporação (TRIVELIN et al., 1994). Já as chuvas, proporcionam o movimento do adubo para camadas mais profundas do solo, reduzindo a volatilização de amônia. Se as chuvas forem leves, pode ocorrer a hidrólise e dissolução do adubo, e devido a quantidade de água não ser suficiente para promover a descida do adubo no perfil do solo, potencializar as perdas de amônia (FRENEY et al., 1991).

Quando se utiliza fertilizante na forma de uréia, a perda de nitrogênio por volatilização de amônia para a atmosfera é um dos principais fatores responsáveis pela baixa eficiência desse fertilizante aplicado sobre a superfície do solo. Para que ocorra volatilização, é necessário que exista simultaneamente no solo, a presença de amônio e um pH elevado. Essas condições ocorrem quando se aplica uréia ao solo, pois a hidrólise desse fertilizante eleva o pH ao redor dos grânulos, ocasionando perdas por volatilização, principalmente se for aplicada sobre a superfície, sem incorporação, e as condições térmicas e hídricas forem favoráveis. A incorporação da uréia diminui a volatilização de amônia devido ao aumento do contato entre o fertilizante e o solo, favorecendo a adsorção de NH_4^+ às cargas negativas. A presença de resíduos culturais sobre a superfície do solo influencia a quantidade de nitrogênio que se perde através da volatilização de amônia, especialmente quando a uréia é aplicada superficialmente. O incremento de matéria orgânica aumenta a população microbiana e a CTC, com isso, tem-se maior atividade da urease, que cataliza a hidrólise da uréia, favorecendo a volatilização de NH_3 (BAYER; MIELNICZUK, 1997). A presença de resíduos vegetais sobre a superfície também reduz o contato da uréia com o solo, diminuindo a

adsorção de NH_4^+ aos colóides orgânicos e inorgânicos, e com isso facilitando a volatilização de amônia (MENGEL, 1996). A quantidade de N perdido por volatilização, após a aplicação de uréia em superfície, pode atingir valores extremos de até 78% do N aplicado (LARA CABEZAS et al., 1997).

Para estimar as perdas por volatilização de amônia do solo provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados pode se utilizar de métodos diretos e indiretos. Métodos indiretos são efetuados por meio do uso de fertilizante marcado (^{15}N). Os métodos diretos utilizam os sistemas fechado-estático, fechado-dinâmico e semi-aberto estático (LARA CABEZAS; TRIVELIN, 1990). Os dois métodos apresentam limitações, o primeiro, devido as determinações isotópicas apresentarem alto custo, e o segundo, necessita de fatores de correção, devidos à redução da percentagem e à quantidade de amônia volatilizada do fertilizante.

2.2.3 Absorção foliar de amônia volatilizada

A amônia da atmosfera também pode, por outro lado, ser absorvida pelos vegetais, após sua dissolução no filme de água que recobre a epiderme foliar e as cavidades estomáticas, principalmente com a formação do orvalho. A intensidade e o sentido com que ocorrem as trocas de amônio entre as folhas e a atmosfera dependem do ponto de compensação do amônio, que pode variar com a temperatura, intensidade luminosa, fotoperíodo, a nutrição nitrogenada da planta, a espécie e a cultivar da mesma espécie, e o estágio vegetativo da planta. Nas concentrações em que a NH_3 se encontra normalmente na atmosfera, que é abaixo do ponto de compensação da planta, ocorre sua emissão pelas folhas, mas em concentrações acima do ponto, o que pode acontecer em caso de volatilização, sua absorção (MATTSSON; SCHJOERRING, 1996). O vento controla a concentração de amônia

nas camadas de ar acima da superfície do solo, e assim pode reduzir ou aumentar a transferência de amônia dessa suspensão ao ar. Além do mais, a absorção de amônia pela folha aumentará com concentrações atmosféricas crescentes de amônia (SOMMER et al., 1993).

Vários estudos utilizando ^{15}N tem demonstrado que as plantas podem absorver quantidades apreciáveis de amônia pelas folhas se a concentração de NH_3 na atmosfera for alta (HUTCHINSON et al., 1972; JANZEN; BRUINSMA, 1989). Porém estes valores são muito variáveis para as diversas culturas estudadas, sendo que para o café esta informação era inexistente até o momento.

2.2.4 Lixiviação de N

O nitrogênio pode também ser perdido por drenagem profunda, em razão da predominância de nitrato (NO_3^{-1}) nos solos sem restrição de oxigênio. Devido ao predomínio de cargas negativas na camada arável, a sua adsorção eletrostática é pequena, sendo o NO_3^{-1} considerado o mais móvel no solo e a forma mais disponível às plantas. Desta forma, o nitrato permanece na solução do solo, o que favorece sua lixiviação no perfil para profundidades inexploradas pelas raízes (SANGOI et al., 2003). Reichardt et al (1982) apresenta vários exemplos de lixiviação de N, avaliados pelo traçador ^{15}N , principalmente em feijão e milho. No entanto, algumas vezes os íons amônio e nitrito também não são fortemente retidos pelos colóides do solo, permanecendo livre na solução do solo e sujeitos ao arraste pela água para fora do alcance das raízes (LIBARDI, 1984).

As quantidades de N-NO_3^{-1} no perfil, susceptíveis à perda, são muito variáveis, dependendo da quantidade de nitrogênio adicionado, do tipo de adubo, da taxa de

mineralização do nitrogênio nativo, da remoção pelas colheitas, do tipo de cultura e do volume de água drenada, fatores estes afetados significativamente pelas propriedades do solo (capacidade de troca iônica, pH, textura, estrutura, matéria orgânica, relação C/N, etc.) e pelo clima (precipitação, principalmente) (REICHARDT; TIMM, 2004). O tipo de solo pode ter grande influência na magnitude do processo de lixiviação. Solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de nitrogênio, principalmente na forma de NH_4^+ , do que solos arenosos. A maior capacidade de armazenamento de água dos solos argilosos reduz a percolação da água pelo perfil, e, com isso o arraste de nitrato para camadas inferiores do solo (CAMARGO et al., 1989; BERTOLINI, 2000). A matéria orgânica também influi na lixiviação de nitrato, devido a maior disponibilidade de nitrogênio decorrente da sua decomposição. A forma de aplicação do adubo pode influenciar as perdas de N por lixiviação. A lixiviação de N pode ser maior quando se incorpora o adubo nitrogenado, devido a redução nas perdas de N por volatilização, resultando em maiores concentrações desse nutriente na solução do solo (BOUWEESTER et al., 1985). A cobertura vegetal sobre a superfície do solo também pode favorecer o movimento descendente de nitrato via macroporos, devido a menor evaporação de água (MUZILLI, 1983)

Para a quantificação desta perda de nitrogênio, portanto, torna-se indispensável o conhecimento da densidade de fluxo de água e da concentração deste elemento na solução do solo. A densidade de fluxo de água tem sido determinada pela equação de Darcy-Buckingham, a qual estabelece que a densidade de fluxo é diretamente proporcional ao gradiente de potencial hidráulico. A constante de proporcionalidade denomina-se condutividade hidráulica (K) e é função da umidade do solo (θ). Portanto, para determinar a densidade de fluxo de água, precisa-se conhecer a função K (θ) e os valores do gradiente de potencial (REICHARDT; TIMM, 2004). O gradiente obtém-se facilmente por meio de

tensiômetros. Para obtenção da função $K(\theta)$, existe uma série de métodos sob condições de campo e laboratório (LIBARDI, 1984).

Para determinação das concentrações de nutrientes na solução do solo tem sido utilizada a técnica na qual a solução do solo é extraída diretamente pela aplicação de vácuo a uma cápsula porosa em contato com a matriz do solo. Em nosso meio, um dos primeiros registros de extração de solução do solo é o de Reichardt et al. (1977). A vantagem desta técnica de extração da solução do solo é seu baixo custo, fácil manuseio do sistema e a extração diretamente do campo da solução do solo, sem destruição de sua estrutura e sempre no mesmo local do perfil. No entanto, oferece algumas desvantagens, como a variabilidade da condutância das cápsulas porosas, o tempo de amostragem, o volume da câmara de vácuo, etc.

Uma vez conhecidos os valores da densidade de fluxo de água e da concentração do íon ou do elemento em questão na profundidade em estudo, estima-se seu fluxo de massa pelo produto de ambos. (LIBARDI; REICHARDT, 1978; MEIRELLES et al., 1980; NIELSEN et al., 1998; TIMM; REICHARDT, 2004).

2.3. Uso do isótopo estável do nitrogênio (^{15}N) em estudos de fertilidade

A técnica isotópica é a mais indicada para determinar o balanço do N no sistema solo-planta-atmosfera, e é descrita em termos gerais por Reichardt e Timm (2004). Pesquisas com N são em menor número em comparação a outros nutrientes, devido a problemas metodológicos, já que são usados para tais experimentos, radioisótopos, devido a grande sensibilidade de detecção. No caso do nitrogênio o radioisótopo de meia vida mais longa é o ^{13}N (10,05 minutos), sendo que os demais radioisótopos tem uma meia vida de segundos ou frações de segundos. Por este motivo, para seguir a absorção do nitrogênio em plantas, os

radioisótopos são inviáveis e são utilizados compostos nitrogenados enriquecidos em ^{15}N , que é estável. A técnica da utilização dos isótopos estáveis como traçadores consiste, em princípio, em fornecer ao organismo em estudo um composto químico no qual a razão isotópica do elemento considerado é diferente da normal e em seguida procurar em que fração dos produtos sintetizados se encontra também aquele elemento com razão isotópica alterada (TRIVELIN et al., 1973; HARDARSON, 1990).

Vários trabalhos foram realizados com citros utilizando ^{15}N para entender a demanda do N em diferentes estádios fenológicos, bem como a sua distribuição dentro da planta (WALLACE et al., 1954; LEGAZ et al., 1982; FEIGENBAUM et al., 1987; LEGAZ et al., 1995; LEA-COX et al., 2001).

No Brasil, entre as culturas perenes, destacam-se os trabalhos de Boaretto et al. (1999a e 1999b), que estudaram a fertilização foliar com ^{15}N em laranjeiras em formação e Fenilli et al. (2004) que estudaram a dinâmica do ^{15}N em laranjeiras jovens cultivadas em solução nutritiva.

Na cultura de café poucos trabalhos foram realizados utilizando ^{15}N . Bustamante et al. (1997) fizeram um balanço do nitrogênio em mudas de café, utilizando nitrato de amônia, uréia e nitrato de potássio marcados. Snoeck e Domenach (1999) demonstraram a transferência de nitrogênio de leguminosas para o café, e em outro trabalho relacionado ao mesmo assunto (SNOECK et al., 1998) avaliaram a fixação biológica das leguminosas utilizadas para adubação verde.

Tendo em vista o proposto, este trabalho tem como objetivo responder as diversas questões sobre o comportamento do N nesta cultura. O conhecimento das reações que interferem na dinâmica do nitrogênio é fundamental para subsidiar recomendações técnicas eficientes sobre o manejo da adubação nitrogenada às plantas, específicas para cada situação de lavoura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local, da planta, do clima e do solo

O experimento foi conduzido de 1º de setembro de 2003 à 30 de agosto de 2005, no campo experimental da Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), no município de Piracicaba, no Estado de São Paulo, com localização geográfica 22°42`S, 47°38`W e altitude de 580 m acima do nível do mar.

Foram utilizadas plantas de café (*Coffea arabica*) cultivar Catuaí Vermelho IAC-44, plantadas em covas ao longo de curvas de nível em maio de 2001, com espaçamento de 1,75 m entre linhas e 0,75 m entre plantas, com a intenção de formar renques.

O solo é classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico, A moderado e textura argilosa, com um declive médio de 10%, sendo algumas características químicas e físicas apresentadas na Tabela 3.1.

O clima é do tipo Cwa segundo Köppen, determinado "tropical de altitude", com médias históricas anuais de temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa de 21,1° C, 1.257 mm e 74%, respectivamente. A estação chuvosa se estende de outubro a março e a seca de junho a setembro. Dados pertinentes ao clima durante o período experimental são apresentados na Figura 3.1.

A área experimental de aproximadamente 0,2 ha foi dividida em 16 parcelas de aproximadamente 120 plantas cada, sendo 15 parcelas utilizadas para o experimento de adubação nitrogenada e a 16ª parcela para o experimento de volatilização de amônia. Em 5 das 15 parcelas, foram destacadas sub-parcelas experimentais para ensaios com ¹⁵N, visando o estabelecimento de balanços de nitrogênio e de água, contendo 9 plantas cada, em áreas de 11,8 m² (Figuras 3.2 e 3.3). O experimento de adubação nitrogenada foi instalado com delineamento estatístico inteiramente casualizado com três tratamentos representando os

níveis de aplicação de N na forma de adubo mineral e cinco repetições ($3 \times 5 = 15$), descritos a seguir: T₀, testemunha (nitrogênio fornecido apenas pelo solo, da ordem de 6.700 kg ha^{-1} de N, representado pela matéria orgânica do solo (MO) na camada considerada neste estudo: 1,0 m), T₁ (nitrogênio fornecido pelo solo + $\frac{1}{2}$ dose de nitrogênio aplicada como fertilizante mineral) e T₂ (N do solo + 1 dose de 280 kg ha^{-1} de N no ano agrícola de setembro de 2003 à agosto de 2004 e de 350 kg ha^{-1} de N no ano seguinte). As doses de N, nos dois anos, foram aplicadas em 4 épocas durante a estação de chuvas, na forma de sulfato de amônio, de acordo com a idade das plantas, análise de solo e expectativa de produção, conforme recomendação oficial. Nas sub-parcelas do tratamento T₂, três plantas centrais (Figura 3.2) receberam sulfato de amônio marcado no ^{15}N , para acompanhamento de sua marcha de absorção e o estabelecimento do balanço do N do fertilizante no sistema.

A cultura recebeu tratos culturais tradicionais, dentro dos quais a adubação com P e K foram iguais para todos os tratamentos. A adubação de plantio foi realizada no sulco (gramas por metro dentro do sulco) com as seguintes doses de nutrientes: 100 g de calcário dolomítico, 70 g de P_2O_5 , 10 g de K_2O , 2,0 g de Mn, 1,0 g de Zn e 0,5 g de B. Após o pegamento das mudas, no 1º ano pós plantio, foram aplicados 24 g planta^{-1} de N em 3 aplicações e 24 g planta^{-1} de K_2O em 2 aplicações. No 2º ano pós plantio foram feitas aplicações de 64 g planta^{-1} de N em 3 parcelamentos junto com 36 g planta^{-1} de K_2O também parcelados em 3 vezes, e 2 aplicações foliares de 500 g de quimifol P30 (30% de P_2O_5) por 100 L de água. A partir do 3º ano foram realizadas as adubações de cobertura com N de acordo com a produção e tratamentos do experimento citados anteriormente, e o K foi adicionado junto com o N, com uma dose de 280 kg ha^{-1} parcelado em 2 épocas de adubação, sendo a primeira aplicação em 03/11/03 e a segunda em 30/01/04 no primeiro ano agrícola e em 03/11/04 e 30/01/05 no segundo ano. As adubações subsequentes de N e K foram realizadas na superfície do solo na

região mediana entre o caule e a projeção da extremidade dos ramos plagiotrópicos, de acordo com a recomendação de Ribeiro et al., (1999).

O início das medições deu-se às 8:00 horas do dia 01 de setembro de 2003, DAI = 0 (dias após o início), quando as plantas apresentavam 2 anos e 4 meses de idade e uma altura média de 1,2 m. As datas posteriores receberam a sigla DAI juntamente com o número de dias que se sucederam. Assim, cada dia experimental se inicia às 8:00 da manhã e termina às 8:00 da manhã do dia seguinte. Na Tabela 3.2, junto com os dados do experimento, é apresentada a esquematização proposta por Pezzopane et al. (2003) das etapas fenológicas do cafeeiro (*Coffea arabica*).

Tabela 3.1- Características químicas e físicas da camada 0 - 0,2 m do Nitossolo Vermelho Eutroférico da área experimental.

<i>Características químicas</i>									
pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----						%
5,3	31	8	4,3	29	20	30	53,1	83,1	64
<i>Características físicas</i>									
areia		silte	argila		Densidade do solo				
					linha		entre-linha		
		%			kg dm ⁻³				
25,5		30,9	43,6		1,46		1,55		

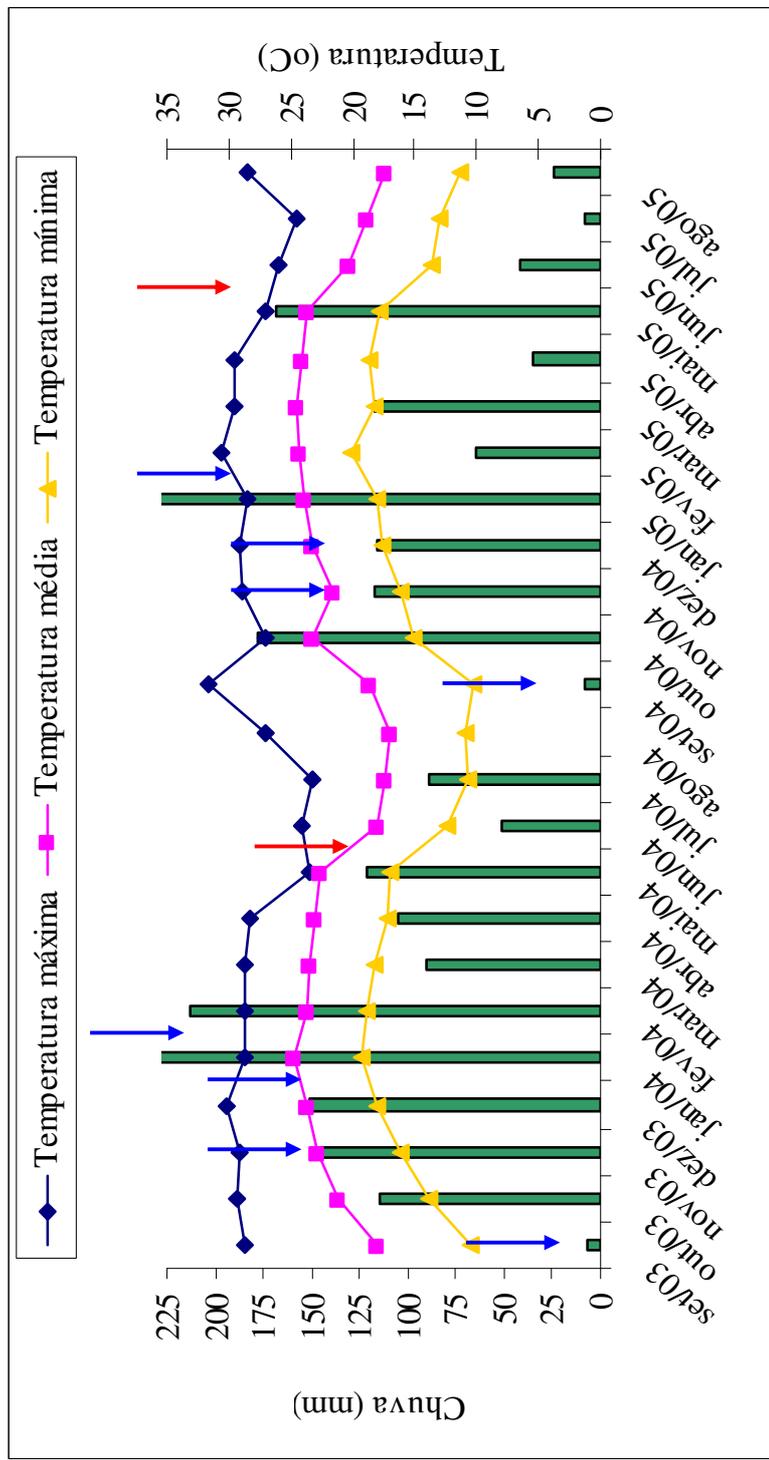
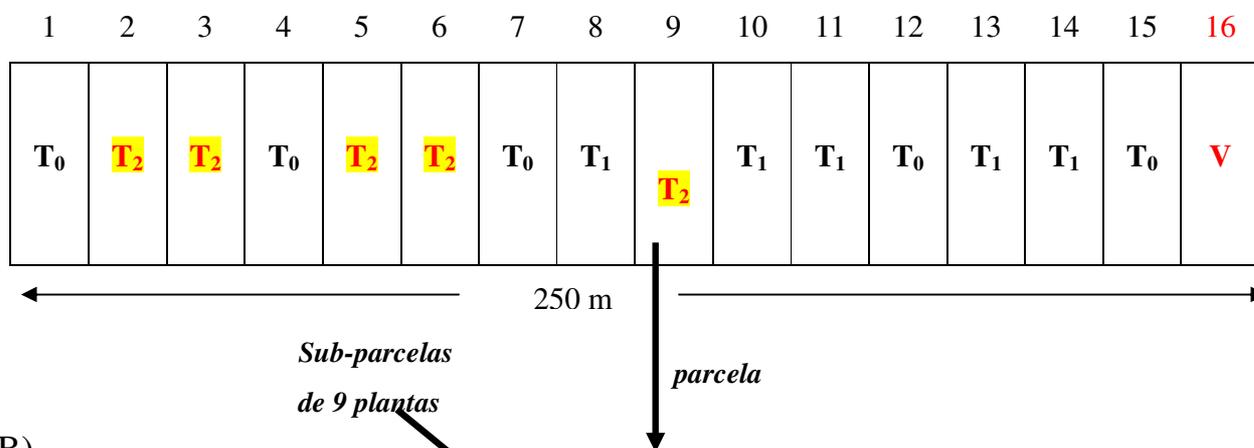


Figura 3.1. Dados climáticos da área experimental durante os anos agrícolas 2003/2004 e 2004/2005 (DAI 0 a 730). (as setas azuis representam os momentos da aplicação do fertilizante marcado, e as setas vermelhas as colheitas)

(A)



(B)

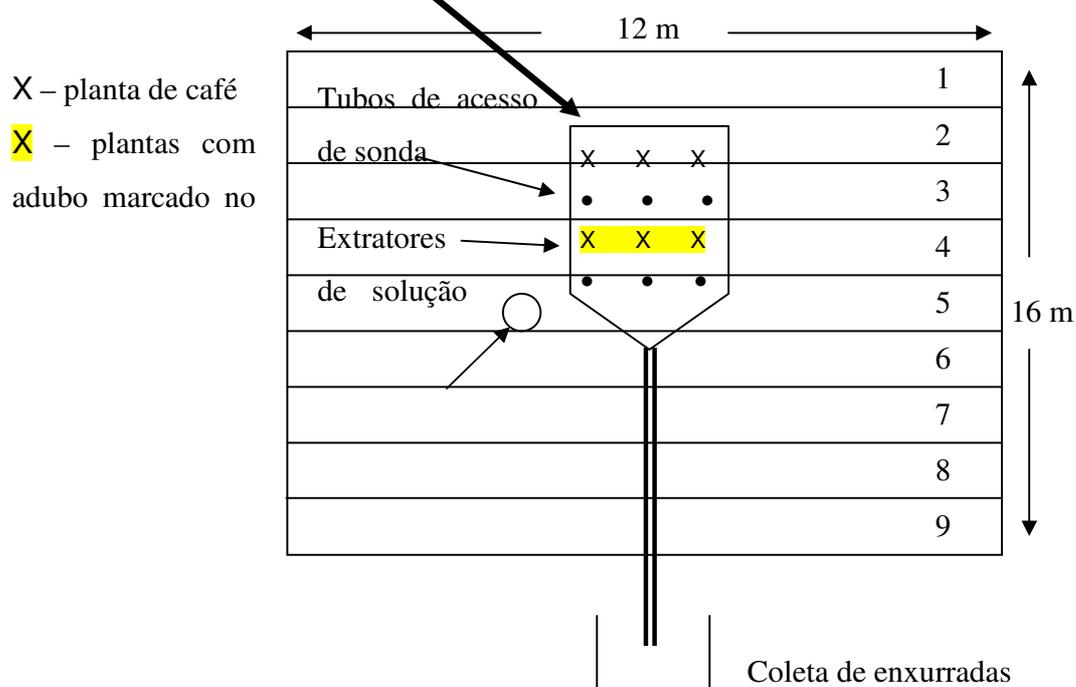


Figura 3.2. A: Esquema da área experimental com as 16 parcelas numeradas de 1 a 16, indicando as parcelas 2, 3, 5, 6 e 9 de T₂ onde foi realizado o balanço de N com fertilizante marcado; B: Detalhes de uma parcela com a sub-parcela indicando a localização das plantas que receberam adubo marcado com ¹⁵N e o instrumental utilizado.

Tabela 3.2 - Fases fenológicas do cafeeiro arábica de acordo com Pezzopane et al. (2003) e dados do experimento de acordo com a fenologia do cafeeiro.

Fases fenológicas do cafeeiro	Vegetação e formação das gemas foliares (Dias longos)							Indução e maturação de gemas florais (Dias Curtos)					Florada Chumbinho e expansão dos frutos			Granação dos frutos		Maturação dos frutos		Repous o				
	Período vegetativo										Repouso	Período produtivo										Autopoda		
	Novo período vegetativo																							
Meses do ano	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
DAI (dias após o início)	0	63	105	126		182		243			366	367	430	472	491	548	636			731				
Datas	-----2003/2004-----											-----2004/2005-----												
	01	03	15	05		02		02			31	01	03	15	03	01	28			31				
Amostragens	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a		5 ^a		6 ^a			7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a			11 ^a							
Adubações	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a							5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a										



Figura 3.3. Vista da área experimental em DAI 0 mostrando as 9 linhas de café e a posição das sub-parcelas T₂ que podem ser observadas através dos tanques de 200 L instalados na parte inferior, para coleta de enxurradas.

3.2 Avaliação do nitrogênio na planta (parte aérea e raiz)

Para quantificar o nitrogênio total na planta e o proveniente do fertilizante aplicado, além de sua distribuição dentro da planta, foi realizado um experimento nas 5 repetições do tratamento T₂ com a dose de 280 kg ha⁻¹ de N no 1º ano agrícola, na forma de sulfato de amônio, aplicada em 4 épocas : ¼ em 01/09/03 (DAI 0), ¼ em 03/11/03, 63 dias depois (DAI 63), ¼ em 15/12/03, 45 dias depois (DAI 105) e ¼ em 30/01/04, 45 dias depois (DAI 151). Esta adubação foi repetida no 2º ano agrícola com a dose de 350 kg ha⁻¹ de N , também aplicada em 4 épocas, sendo a primeira aplicação realizada em 01/09/04 (DAI 367), a segunda em 3/11/04 (DAI 430), a terceira em 15/12/04 (DAI 472) e a quarta em 30/01/05 (DAI 518). O sulfato de amônio aplicado nos dois anos estava enriquecido no ¹⁵N com concentração isotópica igual a 2,072 ± 0,001% de átomos de ¹⁵N.

Devido ao alto custo do fertilizante marcado, este estudo foi efetuado apenas nas 5 sub-parcelas experimentais dentro do tratamento T₂, com 9 plantas, tendo somente as três plantas centrais da sub-parcela recebido ¹⁵N, nas quais foi feito o acompanhamento da absorção do ¹⁵N durante os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura através de amostragens de todas as partes da parte aérea (PA) da planta. Para isso, a cada amostragem (6 no total em cada ano) retirou-se um ramo completo da planta central isotopicamente marcada para medida do N total e do ¹⁵N nas diferentes partes. Como as plantas possuíam mais de 50 ramos no início, considerou-se que esta amostragem não afetaria o desenvolvimento das plantas. Para não sacrificar as plantas marcadas isotopicamente, a massa de matéria seca (mMS) total da PA foi determinada aproximadamente à cada 60 dias nas mesmas épocas, mediante a coleta de uma planta inteira de cada repetição, fora das sub-parcelas de 9 plantas. Para isso escolheu-se a planta que apresentava características o mais semelhante possível da planta central isotopicamente marcada, observando altura, números de ramos plagiotrópicos e níveis de enfolhamento e frutificação. As plantas foram dessecadas em laboratório e submetidas à secagem em estufa à 65°C até peso constante para avaliação da mMS. As diferentes partes da planta foram denominadas de compartimentos para efeito de distribuição e estabelecimento do balanço de nitrogênio (Figura 3.4):

- Compartimento 1: ramo ortotrópico ou caule (C)
- Compartimento 2: ramos plagiotrópicos produtivo (RP)
- Compartimento 3: folhas de ramos produtivos (FRP)
- Compartimento 4: ramos plagiotrópicos vegetativos (RV)
- Compartimento 5: folhas de ramos vegetativos (FRV)
- Compartimento 6: frutos (FR)
- Compartimento 7: total da parte aérea (PA)

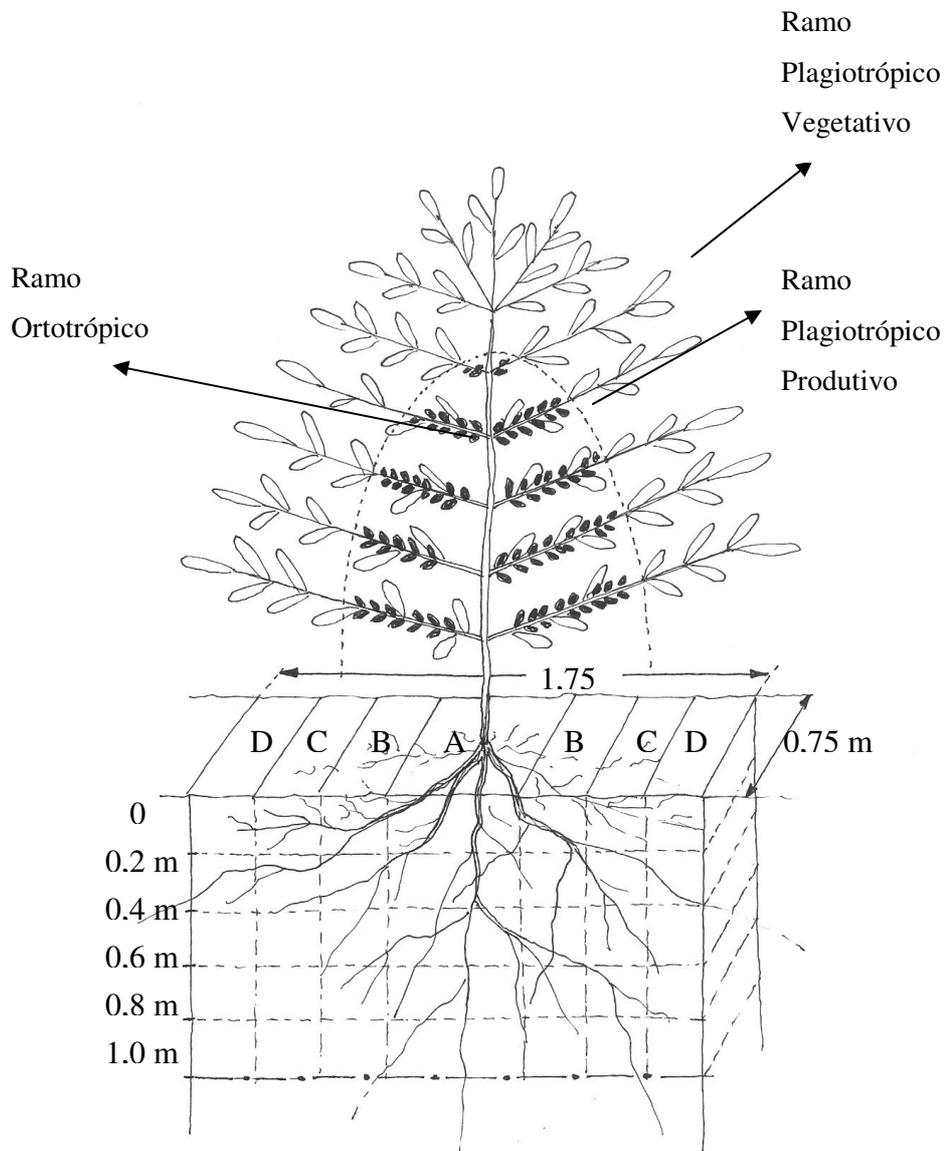


Figura 3.4. Esquema dos diferentes compartimentos da planta e do solo.

A mMS radicular (R) não foi determinada com a mesma freqüência de coleta da parte aérea, mas apenas no final de cada ano agrícola (DAI 366 e DAI 731), com apenas 2 repetições, nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8, 0,8-1,0 m, utilizando trados de 8

cm de diâmetro. Para isso, a área disponível por planta (1,75 x 0,75 m) foi dividida em 4 partes iguais A, B, C e D, sendo que em cada uma delas foram feitas três tradagens (Figuras 3.4 e 3.5). Após separação úmida das raízes contidas no volume cilíndrico de solo amostrado no Root Washer da Delta-T Devices, do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP (Figura 3.6) e sua secagem em estufa à 65° C, os valores médios foram utilizados para a estimativa do total de mMS contida no volume representado pela quarta parte da área, multiplicada pela profundidade, em todos os casos 0,2 m. Desta forma obteve-se a mMS radicular média distribuída na vertical (5 profundidades) e na horizontal (4 áreas se afastando da planta), isto é, uma malha de 20 volumes, como indica a Figura 3.5.

Para efeito de balanço de N foram considerados 6 compartimentos de raiz:

Compartimento 8: raízes da camada 0-0,2 m, incluindo a maior parte da pivotante

Compartimento 9: raízes da camada 0,2-0,4 m

Compartimento 10: raízes da camada 0,4-0,6 m

Compartimento 11: raízes da camada 0,6-0,8 m

Compartimento 12: raízes da camada 0,8-1,0 m

Compartimento 13: total de raiz (R) 0-1,0 m

Raízes abaixo de 1,0 m e fora dos volumes indicados na Figura 3.5 foram consideradas em um compartimento separado, de nº 24, em conjunto com outros compartimentos não avaliados. É importante mencionar que nos compartimentos 8 a 12 podem também existir contribuições de raízes de plantas vizinhas e assim, parte das raízes não consideradas para uma planta é ganha pela vizinha e, em média, a avaliação fica compensada.

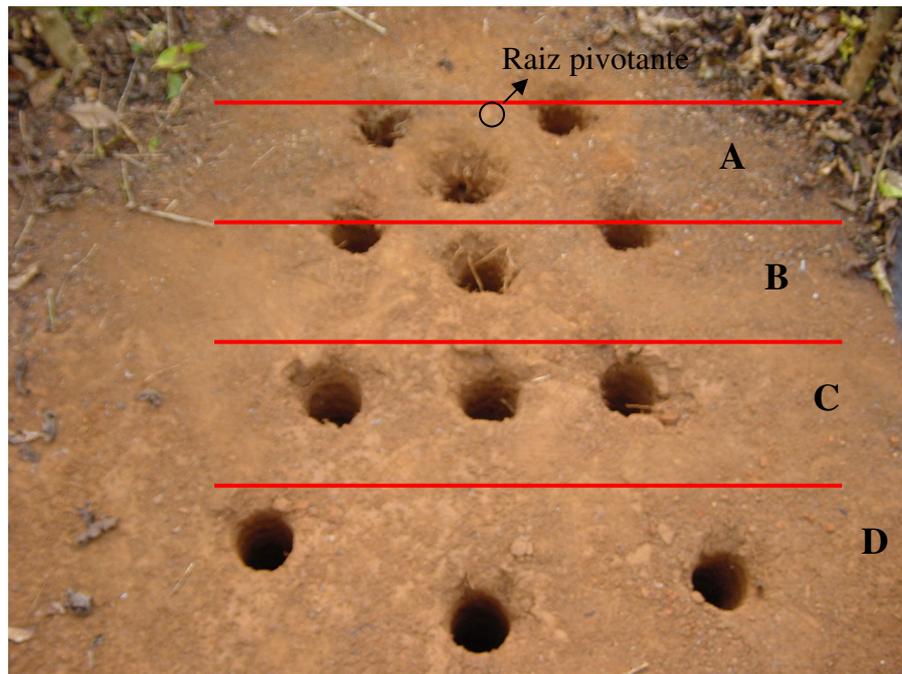


Figura 3.5. Esquema de amostragem de raiz de café.



Figura 3.6. Aparelho utilizado para separação de raiz por lavagem.

Para as análises isotópicas e de N total na parte aérea, foram amostradas partes das plantas marcadas dentro das sub-parcelas de 9 plantas. As amostragens foram feitas obedecendo os compartimentos anteriormente descritos para parte aérea com os cuidados necessários para obter valores representativos, com amostras pequenas utilizadas apenas para medida de N% e abundância isotópica, sem prejudicar o desenvolvimento das plantas. Estas amostras foram pesadas e secas em estufa a 65° C até peso constante. A seguir, sub-amostras homogêneas de 5 µg foram utilizadas para realizar a análise química do material, isto é, a concentração percentual de N e abundância isotópica de ^{15}N em espectrômetro de massa automatizado de fluxo contínuo para análise de nitrogênio e carbono, modelo ANCA-SL, da Europa Scientific, do Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA, descrito por Mulvaney (1993) e Barrie e Prosser (1996) (Figura 3.7).



Figura 3.7. Espectrômetro de massa ANCA SL utilizado nas avaliações de N% e ^{15}N .

As amostras de raiz coletadas ao fim de cada ano agrícola (DAI 366 e DAI 731) foram coletadas por gradagem apenas nas áreas A (Figura 3.4) para não perfurar demais o solo

das sub-parcelas isotópicas e também foram analisadas de acordo com a mesma metodologia em relação ao N% e razão isotópica.

3.3 Nitrogênio no solo

Para a determinação do nitrogênio derivado do fertilizante e presente no solo, foram utilizadas as mesmas amostras de solo em que se determinou ^{15}N das raízes, por tradagem das áreas A (Figura 3.4), nas quais o fertilizante marcado foi aplicado. Para a estimativa do total no compartimento 19 (S), considerou-se o lento movimento lateral do nitrogênio do fertilizante marcado no solo e assumiu-se que os teores nas áreas B, C e D fossem 50, 25 e 12,5% do teor da área A, respectivamente. Esse procedimento foi feito apenas para efeito do balanço de N ao final de cada ano agrícola (DAI 366 e DAI 731) para verificação do ^{15}N remanescente no solo após 1 e 2 anos de cultivo. As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas (peneira de 2 mm) e moídas em moinho de bola (granulometria “talco”) para análise de N e abundância isotópica de ^{15}N por espectrometria de massas, considerando os seguintes compartimentos:

Compartimento 14: solo da camada 0-0,2 m

Compartimento 15: solo da camada 0,2-0,4 m

Compartimento 16: solo da camada 0,4-0,6 m

Compartimento 17: solo da camada 0,6-0,8 m

Compartimento 18: solo da camada 0,8-1,0 m

Compartimento 19: total S (0-1,0 m)

A quantidade de solo contida no volume representado pela respectiva camada e pela área ocupada por uma planta ($1,75 \times 0,75 \text{ m}^2$) foi estimada por meio de dados de densidade do solo (Mg m^{-3}), utilizando o mesmo esquema da Figura 3.4.

3.4 Nitrogênio Volatilizado

Para quantificar a volatilização de amônia do solo proveniente do fertilizante, foi desenvolvido um experimento à parte, instalado na parcela 16 (Figura 3.2), com delineamento estatístico inteiramente casualizado com 3 tratamentos (testemunha, sulfato de amônio e uréia) e 5 repetições, constituídos por uma planta cada. A uréia foi incluída por ser um adubo frequentemente utilizado, e que apresenta o maior potencial de perdas por volatilização. As adubações foram realizadas nas mesmas datas citadas anteriormente, e utilizada a mesma dose de N do primeiro ano experimental (280 kg ha^{-1} parcelado em 4 vezes). Os adubos foram aplicados na superfície do solo na região mediana entre o caule e a projeção da extremidade dos ramos plagiotrópicos. O método utilizado para quantificar a volatilização de amônia do solo proveniente dos fertilizantes sulfato de amônio e da uréia, foi o do coletor de N-NH_3 semi-aberto estático (Lara Cabezas et al., 1999). A volatilização do sulfato de amônio durante as aplicações do 2º ano agrícola foram tomadas proporcionalmente às do 1º ano.

Imediatamente após cada adubação, foram instalados 2 coletores por planta. O coletor consistiu de uma estrutura tubular de PVC transparente ($0,40 \text{ m}$ de altura x $0,145 \text{ m}$ de diâmetro x 1 mm de espessura) encaixada em um suporte cilíndrico sem fundo, também de PVC branco, colocado no solo (Figuras 3.8 e 3.9). No interior do coletor foram dispostas duas espumas (densidade $0,02 \text{ g.cm}^{-3}$) absorvedoras de amônia, embebidas com 35 mL de solução de ácido sulfúrico 1 M e glicerina 3% (v/v). A espuma superior tinha a função de absorver a NH_3 da atmosfera externa ao coletor, deixando para o absorvedor inferior a retenção da

amônia volatilizada do solo no interior e na área de abrangência do aparelho (165,1 cm²). A cada período de dois dias, as espumas absorvedoras inferiores foram retiradas do aparelho, acondicionadas em sacos de polietileno, e armazenadas em geladeira à 5°C, para posterior determinação do amônio retido, sendo o absorvedor superior, descartado. As espumas foram trocadas de dois em dois dias, durante aproximadamente 15 dias após cada aplicação de fertilizante. A chuva que ocorreu durante o período experimental foi quantificada em pluviômetros. Com base nesses valores adicionou-se no interior dos coletores, imediatamente após cada chuva, um volume de água correspondente, a fim de equilibrar a umidade do solo dentro e fora do aparelho. Esse procedimento recomendado por Lara Cabezas et al. (1999) é necessário para que não ocorra superestimativa de perdas de NH₃ no interior do aparelho relativamente às da parte externa. A extração do N-NH₃ retido no disco de espuma foi realizada por lavagem forçada com água deionizada, em sistema constituído por funil de Buchner-Kitassato sob vácuo, até volume de 500 mL. O extrato obtido foi acidulado com 1,0 ml de H₂SO₄ 0,1 M e concentrado em estufa de ventilação forçada a 50° C até um volume aproximado de 50 mL e a seguir, destilado pelo sistema Micro Kjeldahl (Lara Cabezas et al., 1999). Com os resultados obtidos a cada dois dias, calculou-se as taxas de volatilização dQ_N/dt em kg ha⁻¹ dia⁻¹, cujo valor integrado no período de coleta forneceu a quantidade acumulada de amônia volatilizada em cada período (Q_N) por hectare.

Para efeito de balanço, o N do fertilizante volatilizado foi considerado como compartimento 20.



Figura 3.8. Ilustração da parcela 16 onde foi instalado o experimento de volatilização de amônia.



Figura 3.9. Detalhe do coletor semi-aberto-estático utilizado para quantificar a volatilização de amônia do solo.

3.5 Nitrogênio Lixiviado

Para calcular a lixiviação do N do fertilizante para fora do elemento de volume de solo considerado para o balanço de N (0 - 1,0 m), em períodos úmidos definidos através do balanço hídrico, foram instaladas três baterias de extratores de solução do solo à vácuo em cada sub-parcela do tratamento T₂ à 1,0 m de profundidade (Figuras 3.2 B e 3.10), visando a determinação da concentração de N e da abundância isotópica de ¹⁵N na solução do solo. Para facilidade de processamento e redução de custos, foram feitas amostras compostas misturando o extrato dos 15 extratores. O extrator de solução do solo consiste de uma cápsula porosa, um tubo plástico flexível e um frasco coletor (Figura 3.11).



Figura 3.10. Vista dos extratores de solução do solo a vácuo instalados em cada parcela T₂ para o cálculo da quantidade de N lixiviada.

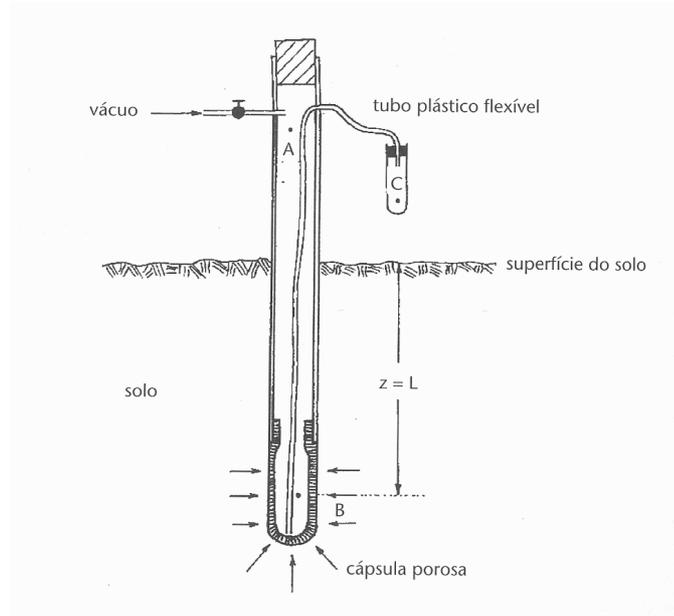


Figura 3.11. Esquema do extrator de solução do solo (Reichardt e Timm, 2004).

Quando os extratores de solução do solo são instalados em solo não saturado, eles não se enchem de água, pois estão à pressão atmosférica e o solo a potenciais negativos. Ao aplicar vácuo (por bomba elétrica ou manual), o interior da cápsula fica sob vácuo e devido à diferença de potencial entre o interior da cápsula e o solo, a solução do solo se dirige para a cápsula. O fluxo de solução depende da diferença de potencial entre o interior da cápsula e o solo. Depois de 1 a 2 horas de vácuo (dependendo da umidade do solo), o vácuo é desconectado e a pressão atmosférica fica aplicada no tubo. Com o frasco coletor ainda sob vácuo, a solução sobe até ele (Reichardt e Timm, 2004). Para quantificar o N nas amostras de solução do solo coletadas a 1,0 m cujo volume de solução era pequeno, foram realizadas análises da concentração de N pelo método FIA (Flow Injection Analysis) no Laboratório de Química Analítica do CENA. Devido a amostra ser líquida e apresentar baixa concentração de N, as amostras foram concentradas em estufa até formar um sal, para a seguir determinar a abundância isotópica por espectrometria de massa no CH_4 do Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA.

A quantidade lixiviada de nitrogênio ($\text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi calculada pelo produto do fluxo de água do solo q_L (mm dia^{-1}) à 1,0 m de profundidade, estimado pelo balanço hídrico (Silva, 2005) e pela concentração C_N (g L^{-1}).

A integração dos fluxos q_L durante todos os períodos de drenagem, resulta no total de nitrogênio lixiviado por ano (NL) considerado como compartimento 21.

3.6 Absorção foliar do nitrogênio volatilizado

Para determinar a quantidade do nitrogênio do fertilizante reabsorvido pela planta proveniente de sua volatilização realizou-se outro experimento instalado nas parcelas do tratamento T_2 , fora das sub-parcelas que estavam expostas ao ^{15}N via adubo e solo. Para isso utilizaram-se bandejas (0,2 m x 0,75 m x 0,05 m) com 7 kg de solo da camada 0-15 cm do campo experimental, dispostas na superfície do solo, abaixo da projeção da copa (Figura 3.12 e 3.13). O solo foi incubado com carbonato de cálcio PA para elevar seu pH, conseguindo-se um valor próximo à 7,5 após 20 dias de incubação, com a finalidade de maximizar a volatilização da amônia e permitir sua detecção nas folhas. As condições médias ambientais nas quais se desenvolveu o experimento são apresentadas na Tabela 3.3.

Na data designada simulou-se uma adubação com uréia marcada com concentração isotópica de 9,95% de átomos de ^{15}N sobre a superfície do solo das bandejas, correspondente à uma dose de N de 70 kg ha^{-1} (1/4 da dose de N aplicada em apenas uma época da adubação do primeiro ano). A uréia com concentração alta de ^{15}N foi escolhida para forçar a volatilização e assim possibilitar a medida de reabsorção pelas plantas. A reabsorção é estimada em percentual de forma que a informação pode ser utilizada no experimento principal de balanço de N, no qual foi utilizado o sulfato de amônio. Após 6 dias de volatilização, o solo foi removido das bandejas, misturado e armazenado à 5° C para, posteriormente, medir o

nitrogênio remanescente e, por diferença, o volatilizado. Ao solo foi adicionado HCl antes da secagem para inibir a continuação da volatilização de amônia, sendo posteriormente analisados N-total e ^{15}N em sub-amostras, por meio de espectrômetro de massa.

No campo, após a remoção das bandejas, amostraram-se as plantas centrais (PC) inteiras abaixo das quais estavam localizadas as bandejas e partes de 8 plantas vizinhas (PV), dispostas ao redor das bandejas (Figura 3.12). As amostras de planta foram secas em estufa a 70°C e moídas para as determinações de mMS, N-total e ^{15}N .

Com base nestes resultados calculou-se a quantidade de N-uréia recuperada (N_r) para cada parte da planta (folhas de ramos vegetativos, ramos vegetativos, folhas de ramos produtivos, ramos produtivos, fruto e caule) proveniente da volatilização do fertilizante, pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4, descritas adiante, e estimada em percentual (A) de fluxos de amônia volatilizada, considerando as 9 plantas da Figura 3.12.

A quantidade de N-uréia volatilizada das bandejas Q_N foi calculada pela diferença entre a quantidade aplicada e o N-uréia que permaneceu no solo incubado durante o experimento.

Tabela 3.3 - Condições meteorológicas e estágio de crescimento da planta durante o experimento de absorção de NH_3 volatilizado.

<i>Parâmetros</i>	<i>Período Experimental</i>
Temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$)	25,8
Precipitação (mm)	6,7
Velocidade do vento (m s^{-1})	0,6
Altura média das plantas (m)	1,97

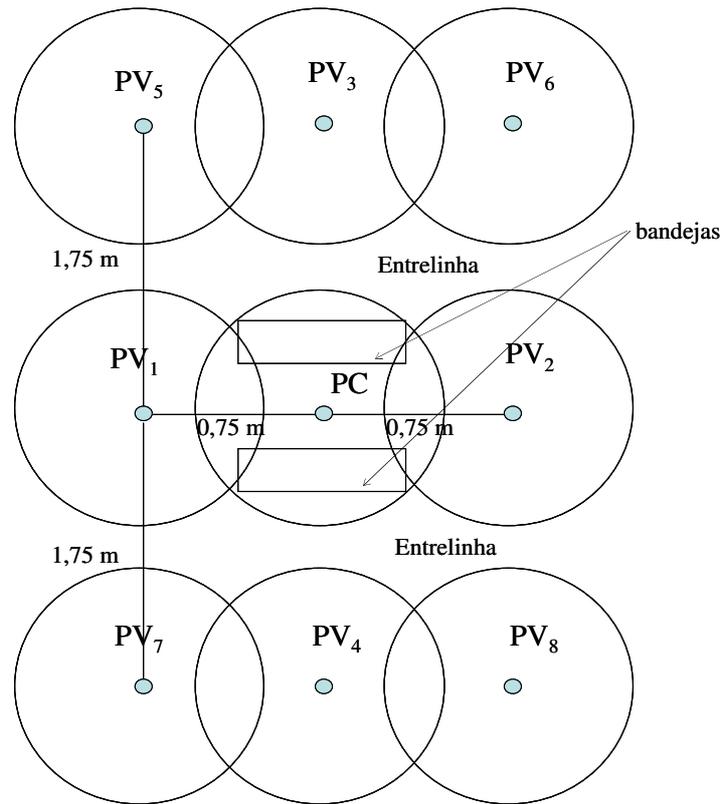


Figura 3.12. Disposição das bandejas na planta central PC, as plantas vizinhas mais próximas PV_{1,2,3,4} e as plantas vizinhas mais distantes PV_{5,6,7,8} utilizadas para amostragem.



Figura 3.13. Detalhe das bandejas colocadas abaixo da projeção da copa do cafeeiro.

Para efeito de balanço, a reabsorção do N do fertilizante volatilizado entra como uma adição de N, e foi subtraído do N volatilizado no compartimento 20.

3.7 Produtividade do cafeeiro

Para determinar a produtividade do cafeeiro, foram realizadas as colheitas dos grãos dos dois anos agrícolas estudados (2003/2004 e 2004/2005). O início da colheita se deu quando as plantas apresentavam menos de 10% de frutos verdes.

As plantas foram colhidas separadamente de acordo com o tratamento e ainda separando-se as parcelas das sub-parcelas de amostragem. Após a colheita, as plantas foram contadas para se ter resultados de produção por planta.

A colheita foi realizada manualmente no pano, e os grãos foram secos até que o teor de água nos frutos atingisse 11 a 12%, em terreiro apropriado. Após a secagem os grãos foram pesados e obteve-se os resultados de produção de “café em coco”. A partir daí os grãos foram beneficiados em máquinas apropriadas e pesados novamente para se ter à produção de café beneficiado.

Na colheita também foram amostrados os grãos para determinar a quantidade de N-total e ^{15}N e para efeito de balanço, a exportação de N pelos grãos foi considerada como compartimento 23.

3.8 Análise dos dados de N

Considerando:

- Massa da matéria seca (mMS_i , g planta⁻¹ ou kg ha⁻¹);
- Concentração de N na matéria seca (C_{Ni} , %);
- Abundância isotópica (A_{Ni} , %)

onde i é o número do compartimento e

$$A_{Ni} = \left[\frac{C_{^{15}Ni}}{C_{^{15}Ni} + C_{^{14}Ni}} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

é possível estimar:

- a) Nitrogênio total acumulado no compartimento i (NA_i , g planta⁻¹ ou kg ha⁻¹)

$$NA_i = mMS_i \times \frac{C_{Ni}}{100} \quad (3.2)$$

- b) Nitrogênio derivado do fertilizante no compartimento i ($Nddf_i$, %)

$$Nddf_i = \left(\frac{A_{Ni} - A_{N_{ei}}}{A_{N_f} - A_{N_{ei}}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

sendo A_{Nf} a abundância isotópica do fertilizante e A_{Nc} a abundância isotópica natural do compartimento i , esta última medida em amostras não marcadas isotopicamente, denominadas como controle.

c) Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante no compartimento i ($QNddf_i$, g planta⁻¹ ou kg ha⁻¹)

$$QNddf_i = \left(\frac{Nddf_i}{100} \right) \times NA_i \quad (3.4)$$

d) Recuperação do N do fertilizante pela planta (R_i , %)

$$R_i = \left(\frac{QNddf_i}{Q_{Nf}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

sendo Q_{Nf} a quantidade de adubo marcado aplicada à cultura até o momento da medida de A_{Ni} .

3.9 Balanço Hídrico

Devido à estreita ligação entre as dinâmicas do nitrogênio e da água no desenvolvimento e crescimento de uma cultura, também foram feitas medidas dos diferentes componentes do balanço hídrico.

A equação clássica de balanço hídrico, que representa o conceito de conservação de massa de água, considera os fluxos de água que entram e que saem de um volume unitário de solo, delimitado pela superfície do solo ($z = 0$) e por um plano horizontal situado em $z = L = 1,0$ m e que deve conter a totalidade do sistema radicular da cultura. Os fluxos foram integrados em relação ao tempo, em períodos de 14 dias, $\Delta t = t_{i+14} - t_i$, pelo mesmo período de 2 anos:

$$\int_{t_i}^{t_{i+14}} p dt + \int_{t_i}^{t_{i+14}} i dt - \int_{t_i}^{t_{i+14}} e dt - \int_{t_i}^{t_{i+14}} r dt \pm \int_{t_i}^{t_{i+14}} q_L dt + S_{i+14} - S_i = 0 \quad (3.6)$$

que por solução das integrais resulta em:

$$P + I - ER + S_{i+14} - S_i - RO - Q_L = 0 \quad (3.7)$$

onde todas as unidades dos componentes do balanço são dadas em mm: P = precipitação pluvial; I = irrigação; ER = evapotranspiração atual; S = armazenamento de água no solo na camada de 0 – 1,0 m em t_i e t_{i+14} ; RO = escoamento superficial, enxurrada ou runoff; e Q_L = fluxos de drenagem ou de ascensão de água no limite inferior do volume de solo, na profundidade $z = 1,0$ m. A coordenada vertical de posição z é tomada como nula na superfície do solo e negativa de cima para baixo. A eq. (3.7) foi usada com valores médios de cinco repetições. Em seguida são apresentados os detalhes de cada componente.

A precipitação pluvial foi medida com pluviômetros do tipo “Ville de Paris”, com área de captação de $0,04047 \text{ m}^2$, instalados junto às sub-parcelas, de tal forma que sua boca ficasse a 1,5 m da superfície do solo (Figura 3.2 B).

Em épocas de muita seca foi feita irrigação suplementar através de um pivô central instalado na área (Figura 3.14). As parcelas de café ficam na extremidade desse pivô o que aumentou a variabilidade de aplicação de água, medida também através dos 5 pluviômetros instalados em cada parcela do balanço hídrico.



Figura 3.14. Vista do pivô central instalado na área do experimento.

Os critérios de quanto e quando irrigar levaram em conta o fato das irrigações serem suplementares e aplicadas apenas em caso de extrema necessidade, por falta ou atraso da chuva. Levaram também em conta aspectos da fisiologia do café, que exige inverno frio e seco para dar início à floração. Depois da floração a falta excessiva de água acarreta queda de frutos. Assim as irrigações foram administradas por critério visual de déficit hídrico, procurando aplicar uma lâmina de 30 mm que, pelos cálculos de armazenamento de água no solo, molharia uma camada de 0,3 a 0,4 m de solo, cobrindo assim a parte principal do sistema radicular do café cuja densidade radicular na camada superficial do solo é muito alta.

Fatores operacionais do pivô e de deriva por vento, porém, não permitiram aplicação correta. De qualquer forma, estes poucos eventos afetaram pouco o balanço hídrico.

A evapotranspiração atual da cultura (ER) foi estimada pela diferença dos outros componentes, de acordo com a eq. (3.7).

O armazenamento da água no solo S, na camada de 0-1,0 m, foi estimado nos tempos t_{i+14} e t_i pela integração em relação à profundidade, de medidas de umidade de solo (θ) obtidas pelo uso de sonda de nêutrons. Para isso, três tubos de acesso para sonda foram instalados até a profundidade de 1,2 m, em cada parcela, totalizando 15 tubos (Figuras 3.2 B e 3.15).



Figura 3.15. Detalhe dos 3 tubos de acesso para sonda de nêutrons instalados até a profundidade de 1,15 m em cada parcela T_2 com o objetivo de medir a umidade do solo as profundidades de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 m.

As medições da umidade do solo foram feitas nas profundidades de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 m nas datas selecionadas, durante todo o período experimental, iniciando em t_i para $i = 0$ (DAI-0) e continuando em t_{i+14} , sendo $i = 0, 14, 28, \dots$, com $\Delta t = 14$ dias, até DAI-728.

O armazenamento de água no solo S (mm) foi aproximado pelo método trapezoidal, como sugerido por Reichardt e Timm (2004):

$$S = \int_0^L \theta dz \cong [\bar{\theta}(t_i)] \cdot L \quad (3.8)$$

onde $\bar{\theta}$ é a média das umidades nas cinco profundidades e a profundidade do solo L é tomada como 1000 mm para que o resultado de S seja obtido em mm.

Para o controle de escoamento superficial de água cada parcela experimental foi delimitada por diques de metal (Figura 3.16). Sua medição foi feita através da água escoada por gravidade pelas parcelas experimentais, que foi coletada em sua parte inferior em coletores de 200 L (Figuras 3.2 B e 3.3). O volume (L) coletado, dividido pela área de cada parcela (12 m^2) resulta na lâmina de água em mm, lembrando a relação: $1 \text{ L/m}^2 = 1 \text{ mm}$.

A perda de água no limite inferior do elemento de volume de solo utilizado para o balanço, por drenagem Q_L foi estimada considerando $Q_L = 0$ na eq. (3.7) do balanço e calculando ER pela mesma equação. Neste caso, ER é superestimada (incluindo Q_L), e $Q_L = ER - K_C \cdot ET_0$.



Figura 3.16. Ilustração das parcelas T_2 delimitadas com chapa metálica para medição de escoamento superficial durante o cálculo do balanço hídrico e fechadas com tela metálica para evitar possíveis danos provocados por capivaras.



Figura 3.17. Vista da área experimental no final dos 2 anos de experimento (731 DAI).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRIMEIRO ANO AGRÍCOLA: DAI 0 (1º set 2003) a DAI 366 (31 ago 2004)

4.1.1 Marcha de absorção do adubo nitrogenado pela parte aérea da cultura

É apresentado na Tabela 4.1, o crescimento das plantas de café em termos de massa de matéria seca dos diferentes compartimentos da parte aérea para diferentes épocas de amostragem (0, 63, 126 e 182 DAI) da floração até a colheita de 2004 (243 DAI).

Tabela 4.1 – Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos da parte aérea da planta nos momentos t iguais a 0, 63, 126, 182 e 243 DAI, referentes ao 1º ano agrícola.

Compartimento	<i>mMS_i (g planta⁻¹)</i>				
	0	63	126	182	243
C ₁ C	320 ± 101,2	304 ± 90,3	371 ± 75,3	413 ± 91,9	578 ± 95,2
C ₂ RP	40 ± 23,2	64 ± 29,0	109 ± 29,7	180 ± 33,34	198 ± 21,1
C ₃ FRP	14 ± 6,12	63 ± 39,8	153 ± 73,7	306 ± 103,3	222 ± 19,1
C ₄ RV	32 ± 10,17	55 ± 22,9	64 ± 23,4	98 ± 20,5	193 ± 54,5
C ₅ FRV	55 ± 35,3	201 ± 36,2	369 ± 105,3	509 ± 112,6	849 ± 246,0
C ₆ FR	0	3 ± 1,8	39 ± 33,8	153 ± 92,0	182 ± 126,0
C₇ PA	461	690	1105	1659	2222

Média de 5 repetições ± desvio padrão

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

No primeiro ano de experimento a partir da floração e da aplicação do N (t = 01/09/03 ou 0 DAI) até o momento da colheita (243 DAI) observou-se aumentos na massa de matéria seca de todas as partes da planta, exceção à uma diminuição (não significativa devido aos altos coeficientes de variação, consequência da dificuldade de amostragem da massa de MS) de caule (C) aos 63 DAI e à uma diminuição das folhas de ramos produtivos (FRP) aos 243

DAI, que são folhas deiscuentes, que provavelmente são folhas exauridas de carboidratos em razão da demanda pelos frutos, e que contribuem para formação de uma serrapilheira que cobre a superfície do solo na linha de plantas e protege a cultura de perdas de água, além de reciclar seus nutrientes. O nitrogênio destas folhas representa uma adubação orgânica para o próximo ciclo produtivo. Houve também um crescimento constante de mMS de ramos vegetativos (RV) e ramos produtivos (RP). O maior aumento de massa de mMS se deu em folhas, principalmente folhas de ramos vegetativos (FRV), devido à altura do caule que cresceu no período associado ao crescimento de ramos vegetativos, e a uma diminuição na competição por carboidratos pelos frutos. Essas folhas são importantes porque irão definir a produção de café do ano seguinte. A Figura 4.1 ilustra bem os dados da Tabela 4.1, mostrando o crescimento relativo das diferentes partes da planta.

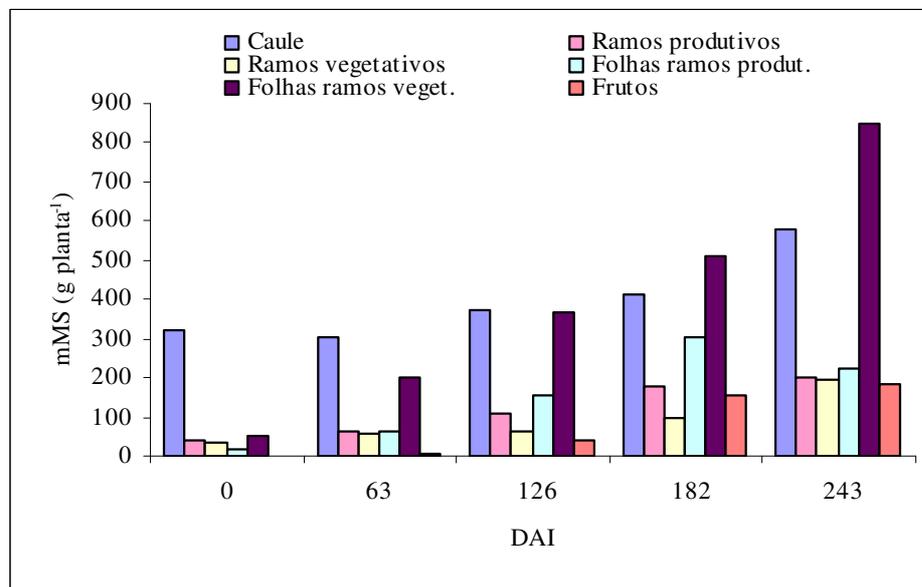


Figura 4.1. Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos das plantas em todos os períodos estudados do 1º ano agrícola (2003/2004).

A mMS₇ total da parte aérea (C₇) apresentou, como nas culturas anuais, um comportamento sigmoidal, caracterizado por taxas de crescimentos maiores na época de

produção de folhas e formação de frutos e por taxas menores ao se aproximar da maturação dos frutos e de sua colheita. Foi possível adaptar um modelo a esses dados de mMS total em função do tempo t (DAI), cuja expressão foi:

$$mMS_7 = a + \frac{b}{1 + e^{-\left(\frac{t-c}{d}\right)}} \quad (4.1)$$

A Figura 4.2 mostra o ajuste da equação (4.2) aos dados de mMS do compartimento 7 da Tabela 4.1. Este ajuste foi obtido por meio do programa Table Curve, com os seguintes valores para os quatro parâmetros:

$$a = 313,23584$$

$$b = 2604,4754$$

$$c = 177,95686$$

$$d = 64,11999$$

e um coeficiente R^2 de 0,9999, o que indica um ajuste praticamente perfeito dos dados experimentais ao modelo. Com a equação de mMS_7 em função de DAI foi possível obter a taxa de crescimento do café, por meio da derivada de mMS_7/dt , cujo gráfico é apresentado na Figura 4.2. A taxa foi crescente de DAI 0 até DAI 172, quando atingiu o máximo de 10,5 g planta⁻¹ dia⁻¹, passando em seguida por decréscimos até a colheita.

A análise da taxa de crescimento evidenciada na Figura 4.2 indica que as 4 aplicações de adubo nitrogenado (0, 63, 105 e 151 DAI) foram realizadas na fase de taxas crescentes de acúmulo de mMS, sendo o último parcelamento aplicado pouco antes da taxa máxima de crescimento. Este fato indica que a escolha da partição do fertilizante em quatro, com

espaçamentos de 60, 45 e 45 dias foi coerente com as necessidades máximas da cultura. A Figura 4.2 também mostra que o crescimento vegetativo é maior em épocas quentes e chuvosas que vão de setembro a fevereiro.

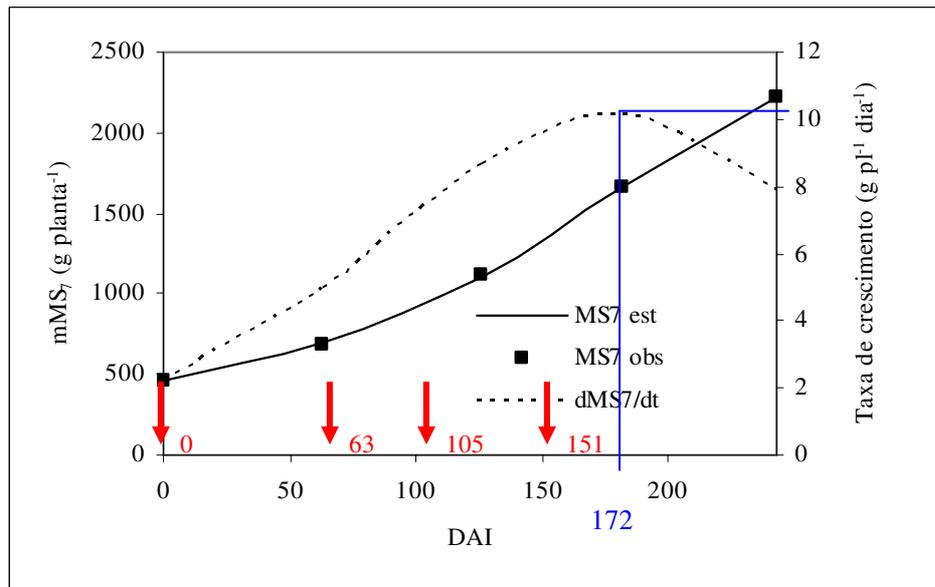


Figura 4.2. Variação da massa de matéria seca mMS_7 no 1º ano agrícola, com dados observados (pontos) e a estimativa (linha cheia) pela equação (4.1) e taxa de acúmulo (linha pontilhada) da mMS (dMS_7/dt) obtida pela derivação da equação (4.1). As setas vermelhas indicam as adubações, e as linhas azuis representam o ponto de taxa máxima de crescimento.

Silva et al. (1984), realizando ensaios no ES, verificaram que a fase mais indicada para adubação nitrogenada deve ser a de pós-florada e antes do início da granação, no período de outubro a fevereiro, em 2-3 parcelamentos, visto que adubações antes da florada de setembro e/ou na fase de início da granação (fins de março) apresentaram efeitos menores no aumento da produção, provavelmente devido às perdas de nitrogênio em setembro (período de pouca precipitação) e em março por ser uma época tardia em face à exigência maior deste período, em que se inicia a granação dos frutos. Matielo et al. (1983) verificaram que as maiores produções foram com tratamentos onde a primeira adubação foi realizada na florada ou no

máximo 45 dias após a mesma, seguidas de outras três espaçadas de 45 ou 60 dias. Os autores sugerem que quando a primeira aplicação for realizada imediatamente após a florada, pode-se adotar o sistema de parcelamento das demais com doses mais elevadas nas últimas adubações.

Na Tabela 4.2, encontram-se os teores de N (C_{Ni}) nos diferentes compartimentos da planta em cada instante estudado. Nota-se que o teor de N varia muito entre compartimentos. Estas variações do teor de N apontam para: 1. mecanismos de transferência de N entre compartimentos; 2. variações no metabolismo do N nos diversos compartimentos. Em todos os tempos, maiores teores de N encontram-se em folhas de ramos vegetativos e folhas de ramos produtivos. Os valores correspondentes à parte aérea (C_7) foram calculados como médias ponderadas em relação à massa de matéria seca de cada parte.

Tabela 4.2 - Teor de N total (C_{Ni}) nos diferentes compartimentos da planta nos momentos 0, 63, 126, 182 e 243 DAI.

Compartimento		C_{Ni} (%)				
		0	63	126	182	243
C ₁	C	0,88	1,45±0,16	1,51±0,27	1,53±0,22	1,49±0,24
C ₂	RP	1,10	1,71±0,32	1,91±0,33	2,04±0,26	1,77±0,28
C ₃	FRP	1,93	3,50±0,47	3,11±0,35	4,01±0,28	3,23±0,25
C ₄	RV	1,40	2,48±0,25	2,51±0,19	2,36±0,27	2,07±0,19
C ₅	FRV	2,32	4,26±0,24	4,05±0,32	3,96±0,33	3,54±0,29
C ₆	FR	0	4,70±0,32	2,93±0,87	3,18±0,36	2,74±0,43
C₇	PA	1,14	2,52	2,73	2,99	2,63

Média de 5 repetições ± desvio padrão

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

C_7 = médias ponderadas em relação à matéria seca de cada compartimento

A Tabela 4.3 contém o enriquecimento de ^{15}N (% de átomos em excesso de ^{15}N) nas diferentes partes da planta. Pela equação 3.2 vê-se que estes valores são proporcionais ao nitrogênio derivado do fertilizante (N_{ddf_i}) e, portanto, são um indicativo direto da absorção

do N do fertilizante. A primeira adubação foi feita em 0 DAI e aos 63 DAI já se nota uma boa absorção do adubo. A segunda adubação ocorreu em 63 DAI e a terceira em 105 DAI, de tal forma que aos 126 DAI, as plantas já haviam recebido $\frac{3}{4}$ da dose total, o que é refletido pelos aumentos dos valores de % de átomos em excesso de ^{15}N em 126 DAI. A última dose de N foi aplicada aos 151 DAI e a amostragem aos 182 DAI apresenta novos aumentos. As reduções das % de átomos em excesso de ^{15}N aos 243 DAI (colheita) são, à primeira vista, inesperados, mas serão explicados adiante através de mecanismos de redistribuição do N na planta, diluições por N nativo do solo e perda de partes da planta (folhas e frutos) pouco antes da colheita. Da mesma forma como foi feito para C_{Ni} , a Tabela 4.3, também apresenta valores médios para compartimento C_7 , calculados como médias ponderadas em relação à mMS de cada parte.

Tabela 4.3 - Abundância Isotópica dos diferentes compartimentos da planta nos momentos 0, 63, 126, 182 e 243 DAI.

Compartimento		Átomos % em excesso de ^{15}N				
		0	63	126	182	243
C_1	C	0	0,187±0,029	0,509±0,066	0,721±0,088	0,324±0,139
C_2	RP	0	0,229±0,024	0,523±0,078	0,883±0,095	0,470±0,113
C_3	FRP	0	0,392±0,048	0,734±0,124	0,953±0,075	0,544±0,127
C_4	RV	0	0,403±0,048	0,741±0,082	0,939±0,108	0,487±0,153
C_5	FRV	0	0,505±0,045	0,844±0,166	0,928±0,117	0,480±0,122
C_6	FR	0	0,387±0,051	0,774±0,108	0,878±0,141	0,433±0,135
C_7	PA	0	0,320	0,676	0,872	0,442

Média de 5 repetições \pm desvio padrão

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

C_7 = médias ponderadas em relação à matéria seca de cada compartimento

Na Tabela 4.4 são apresentados os dados de nitrogênio total acumulado (NA_i) nos diferentes compartimentos da parte aérea da planta nos DAI em que foram feitas as

amostragens. Ela mostra a quantidade de N total nas diferentes partes da planta, e pode-se observar que durante todo o período analisado, as partes que mais acumularam N foram as folhas: folhas de ramos vegetativos (FRV), folhas de ramos produtivos (FRP), além do caule (C), sendo folhas de ramos vegetativos responsáveis pela próxima produção de frutos. A produção de frutos de 2004 foi pequena, devido o cafeeiro ainda estar em formação e ser a sua primeira produção.

Tabela 4.4 - Nitrogênio acumulado (NA_i) nas diferentes partes da planta nos momentos 0, 63, 126, 182 e 243 DAI.

Compartimento		NA_i ($g\ planta^{-1}$)				
		0	63	126	182	243
C ₁	C	2,82	4,43	5,60	6,34	8,61
C ₂	RP	0,44	1,10	2,09	3,67	3,51
C ₃	FRP	0,28	2,21	4,76	12,31	7,18
C ₄	RV	0,46	1,39	1,63	2,32	3,99
C ₅	FRV	1,29	8,60	14,97	20,15	30,05
C ₆	FR	0	0,14	1,15	4,87	5,0
C₇	PA	5,29	17,87	30,2	49,66	58,34

Média de 5 repetições

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

As quantidades relativas do conteúdo de N (NA_i) em cada compartimento, indicam que houve uma redistribuição do N na planta. O caule, apesar de ter crescido, diminuiu seu conteúdo relativo em mais da metade (de 52,9% para 14,8%), e as folhas de ramos vegetativos dobraram o conteúdo de N (de 24,4% para 51,5%). Os frutos também aumentaram expressivamente seu conteúdo de N.

Em relação à quantidade de N do fertilizante (QN_{ddf_i}) presente na planta (Tabela 4.5) vê-se que aos 63 DAI a parte aérea absorveu 4,06 g das 9,19 aplicadas aos 0 DAI (1ª adubação), o que corresponde a 44,1%. É importante lembrar que aos 63 DAI a coleta de

material para medida de N total e ^{15}N se deu instantes antes da 2ª adubação. Aos 126 DAI a cultura já havia recebido três adubações, isto é, $27,57 \text{ g planta}^{-1}$ e absorvido $13,00 \text{ g planta}^{-1}$, ou 47,2%. Aos 182 DAI, data em que QNddf_7 passou por um máximo, as quatro aplicações de fertilizante já haviam sido aplicadas e a parte aérea absorveu $26,2 \text{ g planta}^{-1}$, isto é, 71,3% o que é uma quantidade expressiva. Nota-se, porém, que na colheita (243 DAI) o QNddf_7 se reduziu para $15,77 \text{ g planta}^{-1}$. Esta redução pode ser explicada por três razões: 1. Houve translocação de N para fora da parte aérea, para o compartimento 13, raízes (R), que não foi avaliado nestas datas intermediárias; 2. Perdas de partes de compartimentos, como queda de folhas e de frutos; 3. Perdas de N pela parte aérea na forma de amônia como sugerido por Trivelin et al. (2002). Durante a senescência foliar ocorre o aumento da hidrólise de proteínas e com isso uma redução nas atividades das enzimas glutamina sintetase e glutamato sintase, responsáveis pela assimilação da amônia no metabolismo do N em plantas superiores. As perdas de amônia pela parte aérea dependem do equilíbrio da forma gasosa (NH_3) e a forma iônica (NH_4^+) na solução, que são influenciadas pela temperatura e pH do meio (HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994).

Dos 182 aos 243 DAI, todos os compartimentos perderam N e as perdas relativas de QNddf_i foram: C= 39%; RP = 49%; FRP = 67%; RV = 11%; FRV = 23% e FR = 49%. Descontando as perdas por folhas e frutos, o restante seria translocação para o sistema radicular, que também cresceu e se prepara para o novo ciclo produtivo. Como a maioria dos compartimentos ganhou em N total (NA_i , Tabela 4.4) estas perdas de QNddf_i sugerem que “o nitrogênio mais novo”, aquele do fertilizante aplicado no ano, é mais móvel do que aquele que já faz parte da constituição da planta. É interessante chamar à atenção do fato da importância das amostragens intermediárias, que em nosso caso mostraram que aos 182 DAI a parte aérea das plantas de café já continham 71,3% do N do fertilizante aplicado, número este que com certeza seria maior ainda se as raízes tivessem sido avaliadas. Se a amostragem tivesse sido

feita apenas na colheita, chegaria-se à conclusão de que a PA tinha absorvido apenas 42,9%. Com esta alta eficiência do uso do N do fertilizante, poderia-se até pensar em uma aplicação maior que 280 kg ha^{-1} . A alta eficiência é também uma medida indireta das perdas de N do fertilizante, que foram mínimas como pode ser visto adiante no balanço de N.

Tabela 4.5 - Quantidade de N do fertilizante nas diferentes partes da planta nos períodos 0, 63, 126, 182, 243 DAI.

Compartimento		<i>QNddf_i (g planta⁻¹)</i>				
		0	63	126	182	243
C ₁	C	0	0,49	1,67	2,68	1,64
C ₂	RP	0	0,15	0,64	1,90	0,97
C ₃	FRP	0	0,51	2,05	6,88	2,29
C ₄	RV	0	0,33	0,71	1,28	1,14
C ₅	FRV	0	2,55	7,41	10,96	8,46
C ₆	FR	0	0,03	0,52	2,50	1,27
C₇	PA	0	4,06	13,00	26,20	15,77

Média de 5 repetições

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

Com o intuito de comparar o nitrogênio na parte aérea (PA) proveniente do solo ($QNdds_i = NA_i - QNddf_i$) e o proveniente do fertilizante ($QNddf_i$) é apresentada a Figura 4.3, que mostra esta proporção para as quatro épocas analisadas no 1º ano. A proporção aumentou até 182 DAI, quando passou por um máximo de 1,12, isto é, quando 71,3% do N da parte aérea da planta era constituída do N do fertilizante. A posterior redução da proporção deve-se ao fato das aplicações de fertilizante terem terminado aos 151 DAI. Estes aspectos são de grande importância para o manejo correto dos fertilizantes nesta cultura.

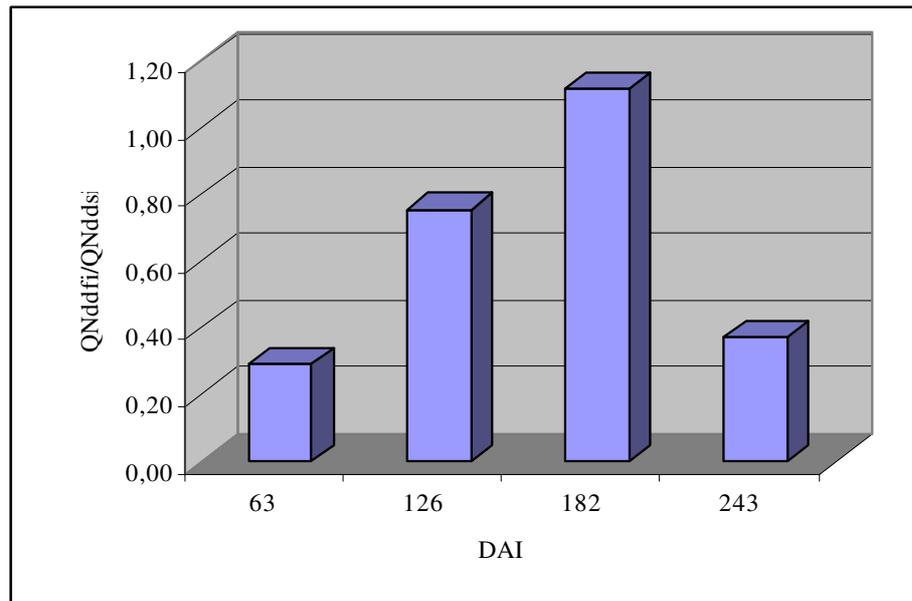


Figura 4.3. Relação $QNdffi/QNdssi$ em todas as épocas estudadas do 1º ano agrícola.

4.1.2 Balanço do Nitrogênio

4.1.2.1 Volatilização da amônia

Os fluxos de $N-NH_3$ por volatilização (dQ_N/dt) dos fertilizantes nas 4 épocas de adubação, são apresentados na Figura 4.4 A, B, C e D. Para os tratamentos testemunha e sulfato de amônio eles foram bem menores que os da uréia, como esperado. Em alguns períodos o sulfato superou as perdas naturais do solo. Nas 4 épocas as avaliações foram interrompidas antes do final do processo de volatilização da uréia e, com o intuito de avaliar o total da volatilização que estava em declínio, fez-se uma extrapolação linear dos últimos dois pontos até que dQ_N/dt atingisse o valor do solo, para o caso da uréia. Esta correção correspondeu em média a menos de 10% do total Q_N . Os tratamentos testemunha e sulfato de amônio apresentaram poucas diferenças entre si, evidenciando que as perdas são reduzidas quando fontes nitrogenadas com formas de N menos susceptíveis à volatilização são usadas,

como é o caso do sulfato de amônio. As perdas de N-NH₃ por volatilização do sulfato de amônio (Tabela 4.6) representaram 1,6% do N aplicado, descontando a volatilização natural do solo (testemunha). Freney et al. (1992) também verificaram que a aplicação de sulfato de amônio resultou em pequenas perdas de N, em torno de 1,8% do N aplicado na cultura da cana-de-açúcar e em solo de pH ligeiramente ácido.

Nas aplicações de 70 kg N ha⁻¹ na forma de uréia, em cada adubação, constatou-se que as épocas que apresentaram as maiores perdas por volatilização de N-NH₃ foram em 08/11 e 03/02 (Figura 4.4 A, B, C e D), com uma perda média de aproximadamente 20 kg ha⁻¹ de N, o que corresponde a 28,6% dos 70 kg ha⁻¹ de N aplicado em cada época. A volatilização da amônia nas quatro épocas teve grande variabilidade (Tabela 4.6), que não pôde ser explicada claramente somente pelas variações de temperatura do ar ou pluviosidade. A redução na perda total de N-uréia em dezembro, independentemente da maior temperatura média, pode estar relacionada à distribuição das chuvas que fez com que o N-uréia fosse incorporado ao solo; o maior valor médio de volatilização verificado em novembro pode ter relação com a taxa de perda de água do solo, valor esse que não foi medido. Do total de N aplicado no campo, utilizando a dose de 280 kg ha⁻¹ de N, a perda do N da uréia seria de 21,0% do total aplicado, também descontando a volatilização natural do solo (testemunha). Estes resultados indicam que o sulfato de amônio é a fonte mais adequada para o fornecimento de N em relação a uréia, no que diz respeito à volatilização. Keller & Mengel (1986) também estudaram as perdas de NH₃ por volatilização e observaram perdas de 31% do N aplicado como uréia granular em milho. Lightner et al. (1990) utilizando diferentes formulações de uréia em gramíneas, observaram que as perdas dos adubos atingiram entre 27 até 44% do N aplicado na primavera, e 12 a 37% quando aplicado no verão.

Tabela 4.6 - N-NH₃ volatilizado (kg ha⁻¹) em função dos fertilizantes aplicados em superfície para uma dose de 70 Kg N ha⁻¹ e em razão da época de aplicação.

<i>Épocas de adubação</i>	<i>Período de avaliação</i>	<i>Temp. média do ar</i>	<i>Chuva</i>	<i>Tratamentos</i>		
				<i>Testemunha</i>	<i>Sulfato de amônio</i>	<i>Uréia</i>
	<i>(dias)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(mm)</i>		<i>kg N ha⁻¹</i>	
03/09/03	14	19,84	5,2	1,18aA	1,29aA	12,03bB
08/11/03	14	24,26	82,3	1,04aAB	2,60aB	20,74bA
10/12/03	13	25,30	48,3	0,81aB	2,24aB	10,80bB
03/02/04	15	23,68	60,7	0,84aB	2,33aB	19,12bA
Totais				3,87	8,46	62,69

Médias sucedidas pela mesma letra minúscula na linha ou maiúscula na coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, em nível de significância de 5%

Alguns autores relatam que maior volatilização da amônia ocorre nos 4 primeiros dias após a aplicação do fertilizante, e que as maiores perdas ocorrem nas primeiras 24 horas (Khanif, 1992; Zhang, 1992). Porém estes dados dependem das condições atmosféricas e propriedades do solo. Marzola et al., (2000), estudaram as perdas de N-NH₃ após 24 horas de aplicação de 240 kg ha⁻¹ de uréia em cafeeiro adensado de espaçamentos 2,0, 3,0 e 1,5 m, e observaram perdas de amônia de 4,9, 3,0 e 2,7 kg ha⁻¹, respectivamente. Estas perdas foram crescentes até o 3° e 4° dia após a aplicação. Em nosso caso, as perdas de amônia por volatilização tiveram seu pico entre 2° e 4° dias após a aplicação (Figura 4.4 A, B, C e D), seguidas de um declínio que, para a uréia permaneceu por aproximadamente mais 15 a 20 dias.

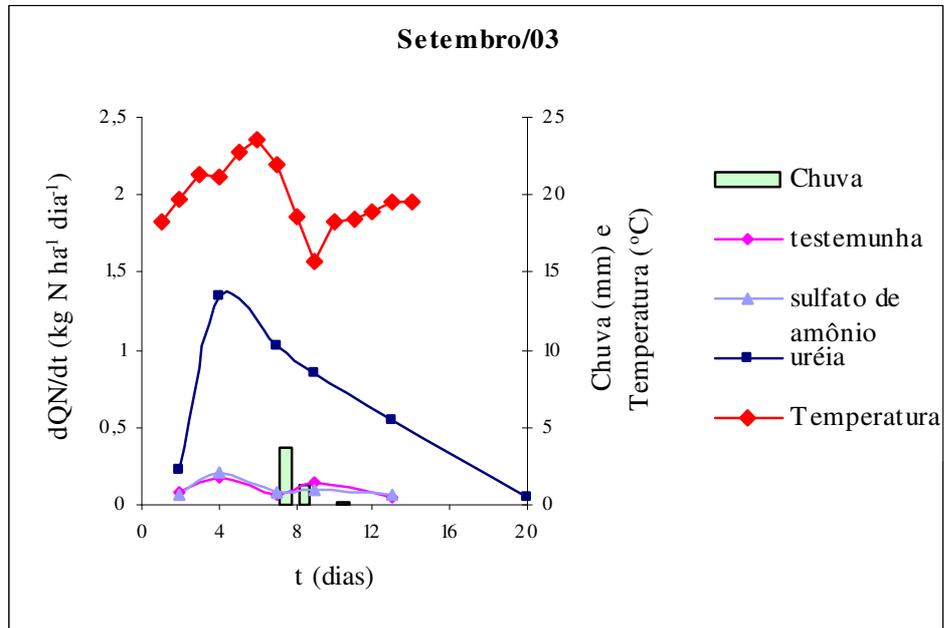


Figura 4.4A. Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em setembro de 2003.

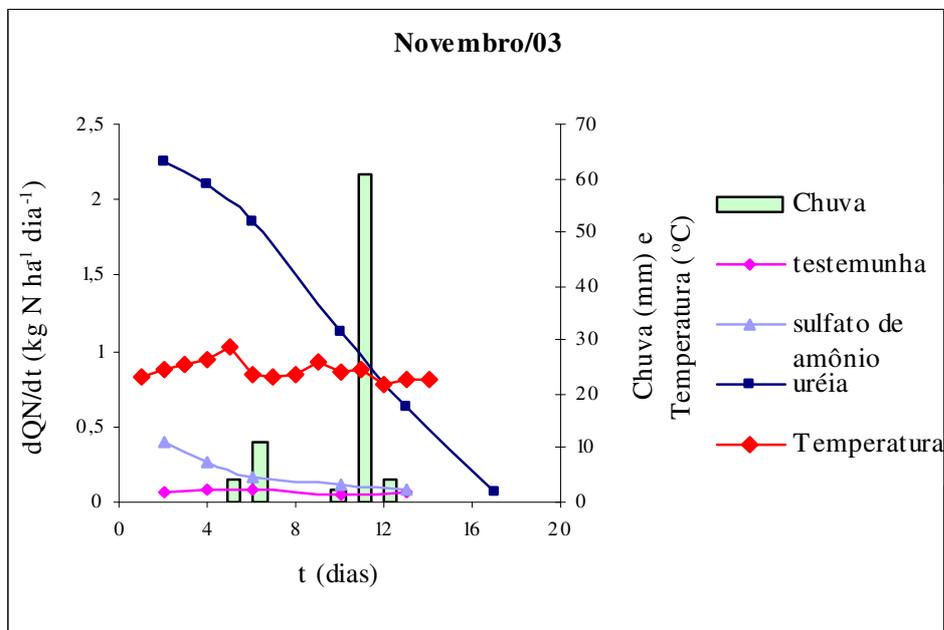


Figura 4.4B. Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em novembro de 2003.

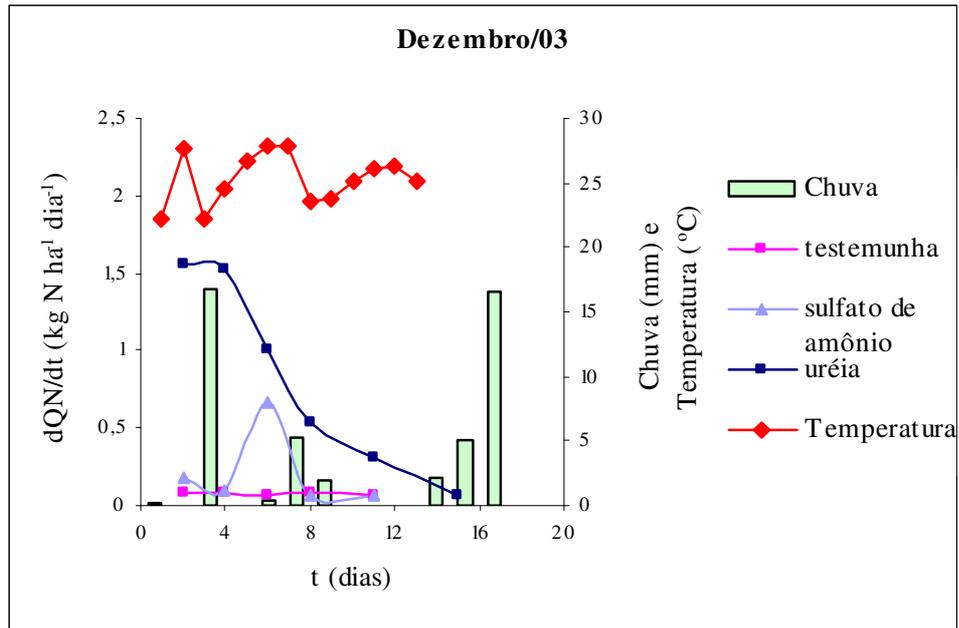


Figura 4.4C. Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em dezembro de 2003.

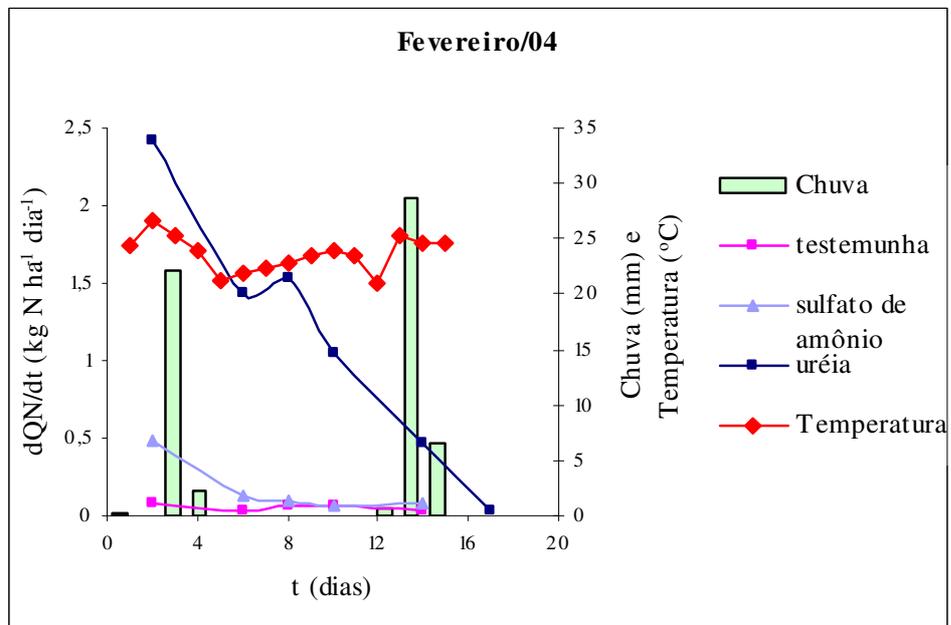


Figura 4.4D. Fluxos de NH_3 volatilizada, temperatura e precipitação em fevereiro de 2004.

4.1.2.2 Absorção Foliar de amônia volatilizada

Na Tabela 4.7 encontram-se os resultados totais de amônia volatilizada da uréia aplicada as bandejas e a absorção pelas plantas do nitrogênio volatilizado. A variabilidade dos dados do solo das bandejas foi pequena, com um CV de 4,22%, indicando que a volatilização do N da uréia, calculada por diferença, foi satisfatória. Já a absorção do N volatilizado teve um CV de 41,18%. Este fato é explicado pela dificuldade desta avaliação, que depende dos processos de difusão/convecção da amônia abaixo da saia da planta de café e da amostragem das plantas que deveria atender às absorções das diferentes partes da planta, que são função das condições dinâmicas do ar dentro da planta e da capacidade de absorção de N de cada parte. Sommer et al. (1993) indicaram que cerca de 2,2% de amônia perdida à atmosfera foi absorvida pelas folhas de trigo. Em outro estudo, Ping et al. (2000) reportaram que em média 11% do N volatilizado da uréia aplicada em superfície foram absorvidos por folhas de trigo. A estimativa deste trabalho, com a cultura do café, foi bem diferente das que existem na literatura com culturas anuais. No cafeeiro a arquitetura do dossel deve propiciar o tempo de residência da amônia no interior da planta, e assim propiciar um maior aproveitamento do N volatilizado.

Tabela 4.7 - Volatilização de N proveniente da uréia e reabsorção foliar do N volatilizado em um período de 6 dias.

<i>Repetições</i>	<i>N volatilizado</i>		<i>Absorção do N volatilizado</i>	
	<i>kg N ha⁻¹</i>	<i>%</i>	<i>kg N ha⁻¹</i>	<i>%</i>
1	59,19	84,54	18,01	30,42
2	53,69	76,68	28,69	53,43
3	58,66	83,77	38,89	66,29
4	59,49	84,96	27,33	45,94
5	59,18	84,51	12,20	20,61
Média	58,04 ± 2,45	82,89	25,02 ± 10,30	43,34
CV	4,22 %		41,18 %	

Média de 5 repetições

Dos 70 kg de N por hectare de uréia aplicados na superfície do solo das bandejas, em média 58,04 kg ha⁻¹ de N foram volatilizados, o que corresponde a 82,89% do total aplicado, avaliado com um pequeno CV de 4,22%, o que mostra que a volatilização foi muito bem estimada. Esta alta volatilização se deve ao aumento de pH conseguido com aplicação de calcário no solo das bandejas. Altas concentrações de amônio e pH elevado aumentam a hidrólise da uréia, ocasionando maiores perdas de amônia para atmosfera.

A quantidade de amônia volatilizada e absorvida pela planta foi, em média de 3,28 g planta⁻¹, que corresponde a 25,02 kg ha⁻¹ ou 43,34% do N que foi volatilizado. Este valor apresentou uma grande variabilidade, com um CV de 41,18%, o que é razoável neste caso em que o processo de volatilização em condições de campo é afetado por vários fatores atmosféricos dentro do dossel, tais como vento, umidade do ar e das folhas, temperatura, arquitetura da planta. A Tabela 4.8 evidencia estes aspectos mostrando a contribuição das plantas vizinhas (PV) na absorção do N volatilizado sob a saia da planta central (PC). Trata-se de um valor alto, pois considerando uma adubação de café de 280 kg N por hectare na forma de uréia, com uma perda de amônia por volatilização de 58,82 kg ha⁻¹ de N, que corresponde a cerca de 21% do N do adubo aplicado, 43% seriam absorvidos pela parte aérea da planta, que representa 25,29 kg ha⁻¹ do total aplicado, ou seja, 9%.

Tabela 4.8 - Contribuição de cada planta no total absorvido (100%) do N volatilizado.

<i>Plantas</i>	<i>% do N reabsorvido</i>
Planta Central	27,9
Planta Vizinha 1	21,8
Planta Vizinha 2	16,7
Planta Vizinha 3	7,4
Planta Vizinha 4	7,4
Planta Vizinha 5	4,7
Planta Vizinha 6	4,7
Planta Vizinha 7	4,7
Planta Vizinha 8	4,7

4.1.2.3 Lixiviação

Com relação ao N lixiviado durante o 1º ano agrícola (N_L , compartimento 21), os resultados de C_N e A_N das amostras coletadas pelos extratores de solução de solo a 1,0 m de profundidade possibilitaram o cálculo da quantidade lixiviada de nitrogênio (mg m^{-2}) pelo produto do fluxo acumulado de água do solo Q_L (mm) pela concentração do elemento C_N (mg L^{-1}).

As medidas efetuadas por Silva (2005) e apresentadas adiante, no item balanço hídrico, indicam que houve drenagem Q_L abaixo da profundidade 1,0 m, apenas durante 5 balanços hídricos:

DAI 140 à DAI 154: 56,8 mm

DAI 154 à DAI 168: 31,5 mm

DAI 168 à DAI 182: 82,3 mm

DAI 266 à DAI 280: 22,7 mm

DAI 322 à DAI 336: 20,7 mm

com um total $Q_L = 214,0$ mm. Apesar das várias tentativas, só foi possível extrair solução do solo em DAI 175, cujo resultado foi $C_N = 0,01384$ g L^{-1} , com uma abundância de 0,373 átomos % em excesso de ^{15}N . Como o fertilizante foi aplicado parceladamente e o processo de deslocamento miscível do NO_3 é lento em uma camada de 1,0 m de solo, assumimos que estes valores de C_N e A_N fossem os mesmos durante o processo anual de lixiviação. Assim, em termos médios, temos:

$$Nddf_{21} \% = (0,373/1,705) \times 100 = 21,877\% \quad (\text{equação 3.2})$$

$$N_L = Q_L \times C_N = (214,0 \text{ L m}^{-2} \times 0,01384 \text{ g L}^{-1}) = 2,96 \text{ g m}^{-2} = 29,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

$$QNddf_{21} = (29,6 \times 21,877)/100 = 6,47 \text{ kg ha}^{-1} \quad (\text{equação 3.3})$$

$$R_{21} = (6,47/280) \times 100 = 2,3\% \quad (\text{equação 3.4})$$

Pelos resultados obtidos, observa-se uma lixiviação do N do fertilizante de 6,47 kg de N por hectare na profundidade de 1,0 m, correspondente a 2,3% da quantidade de adubo aplicada, valor relativamente pequeno. Isso se deve, principalmente, ao seu parcelamento, que levou a uma alta eficiência de absorção, e ainda ao fato do solo ser argiloso, apresentando maior retenção de água e menor condutividade hidráulica e, conseqüentemente, menor drenagem. Em anos mais chuvosos, poderia-se esperar maiores valores de N_L e $QNddf_{21}$.

4.1.2.4 Contabilização do N do fertilizante no fim do 1º ano (DAI 0 - 366)

Ao final do primeiro ano do experimento (366 DAI), foi fechado o balanço do N derivado do fertilizante para todos compartimentos do sistema solo-café-atmosfera, apresentado na Tabela 4.9, com dados expressos em kg ha^{-1} . Neste balanço também foram contabilizados os compartimentos da raiz, do solo, da volatilização, da lixiviação e os compartimentos 22 (serrapilheira, compreendendo folhas e frutos caídos ao chão), compartimento 23 (exportação pelos frutos) e compartimento 24 (“outros”, que representa valores de $QNddf$ que não foram estimados, como a absorção de $Nddf$ pelas plantas vizinhas (da outra linha), por raízes abaixo de $z= 1,0$ m, perdas de N pela água do run-off, perdas de N pela parte aérea, lixiviação de N abaixo de 1,0 m, e pode-se incluir também os erros envolvidos nas medidas dos demais compartimentos) fechando assim o balanço em 100%.

Desnitrificação não entrou no item outros, foi considerada nula devido às condições aeróbicas que prevaleceram durante todo período experimental.

Tabela 4.9 - Destino do N do fertilizante (QNddf_i) nos diferentes compartimentos e sua recuperação (R%), depois de um ano de cultivo (DAI 366).

<i>Compartimento</i>		<i>QNddf_i (kg ha⁻¹)</i>	<i>R(%)</i>
1	Caule	17,85 ± 164,92	6,38
2	Ramos Produtivos	9,06 ± 31,48	3,24
3	Folhas de Ramos Produtivos	3,40 ± 19,24	1,21
4	Ramos Vegetativos	5,58 ± 21,15	1,99
5	Folhas de Ramos Vegetativos	18,75 ± 58,68	6,70
7	Sub-total da parte aérea	54,64	19,51
8	Raiz da camada 0-0,2 m	26,18	9,35
9	Raiz da camada 0,2-0,4 m	7,18	2,56
10	Raiz da camada 0,4-0,6 m	4,02	1,44
11	Raiz da camada 0,6-0,8 m	1,22	0,43
12	Raiz da camada 0,8-1,0 m	1,17	0,42
13	Sub-total de raízes	39,77	14,20
14	Solo da camada 0-0,2 m	30,41	10,86
15	Solo da camada 0,2-0,4 m	8,83	3,15
16	Solo da camada 0,4-0,6 m	4,10	1,46
17	Solo da camada 0,6-0,8 m	2,93	1,05
18	Solo da camada 0,8-1,0 m	3,83	1,37
19	Sub-total de solo	50,10	17,89
20	Volatilização	4,59 – 1,99¹	1,64 – 0,71¹
21	Lixiviação	6,47	2,31
22	Serrapilheira	79,37	28,35
23	Exportação pelos grãos	19,09	6,82
24	Outros²	27,96	9,99
25	Total Geral	280,00	100,00

¹ Valor em vermelho é referente à reabsorção do N volatilizado pela parte aérea da planta

² Outros = valores de Nddf não estimados

Na parte aérea foi observada uma recuperação do N do adubo aplicado de 54,64 kg ha⁻¹, que corresponde a 19,51% do N aplicado. Como discutido no item anterior, aos 182 DAI a PA já tinha recuperado 71,27%, tendo havido portanto uma redução de QNddf₇ até 366 DAI, por conta de perdas de mMS e redistribuição de N. Esta observação teria sido perdida, se as avaliações tivessem sido feitas apenas ano após ano, como é comum em estudos de plantas perenes, como o café, o citrus, a seringueira. A serrapilheira formada acumulou 28,35% do N aplicado, e portanto, é uma excelente fonte de fertilização orgânica. A raiz foi responsável em absorver 39,77 kg ha⁻¹, ou seja, 14,20% do N do fertilizante, sendo que 9,35% do adubo estava em raízes da camada 0-0,2 m. No solo encontrou-se 50,10 kg de N ha⁻¹ que corresponde à 17,89% do N do sulfato de amônio aplicado, sendo a camada 0-20 cm onde verificou-se a maior concentração do N do fertilizante. Este N continua à disposição da planta para o próximo ciclo. O total de perdas efetivas, como volatilização e lixiviação, foi de apenas 3,24%. A exportação pelos grãos foi pequena neste ano: 6,82%, mas trata-se de uma perda “útil”, uma vez que ela representa a produção da cultura.

Em termos gerais, no balanço da Tabela 4.8, verifica-se que 19,51% do Nddf estava na parte aérea da planta, 14,20% nas raízes e 28,35% nas folhas caídas ao chão, o que mostra uma eficiência de absorção do adubo pela planta, de 62,06%. Esta alta eficiência deve-se à vários fatores: 1. aplicação do fertilizante antes da redução da taxa de crescimento da cultura; 2. a fonte de N utilizada, sulfato de amônio, que apresenta menores perdas por volatilização; 3. a forma de aplicação do fertilizante, parcelado em 4 épocas e aplicado próximo as raízes superficiais da camada de solo coberta pela serrapilheira; e 4. ao regime hídrico favorável nas épocas das adubações.

4.2 SEGUNDO ANO AGRÍCOLA: DAI 366 (1º set 2004) a DAI 731 (31 ago 2005)

4.2.1 Marcha de absorção do adubo nitrogenado pela parte aérea da cultura

Os valores médios de massa de matéria seca do 2º ano agrícola, dos diferentes compartimentos da parte aérea das plantas de café para diferentes épocas de amostragem (366, 430, 491 e 548 DAI) até a colheita de 2005 (636 DAI) são apresentados na Tabela 4.10 e Figura 4.5.

Tabela 4.10 – Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos da parte aérea da planta nos momentos t iguais a 366, 429, 494, 548 e 636 DAI, referentes ao 2º ano agrícola.

Compartimento	<i>mMS_i (g planta⁻¹)</i>				
	366	430	491	548	636
C ₁ C	741±164,9	796±142,16	764±122,3	918±259,1	1081±164,3
C ₂ RP	220±31,5	427±115,1	308±18,7	329±95,2	340±30,9
C ₃ FRP	43±19,2	84±31,2	38±10,6	29±18,3	22±12,2
C ₄ RV	99±21,1	72±12,4	66±7,3	113±20,7	147±36,5
C ₅ FRV	249±58,7	308±54,9	408±45,4	729±164,3	756±54,2
C ₆ FR	40±14,1	80±28,4	578±101,1	896±270,2	1598±577,6
C₇ PA	1392	1767	2162	3014	3944

Média de 5 repetições ± desvio padrão

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

No segundo ano de experimento, no período que vai da floração até a colheita (636 DAI), observou-se aumento de massa seca de todos os órgãos da planta, exceção a folhas de ramos produtivos (FRP), onde houve uma redução de 50% da sua massa seca, em função dessas folhas apresentarem uma abscisão durante o período de produção de grãos, sendo estas folhas responsáveis pelas reservas de carboidratos. Houve um aumento expressivo de folhas de ramos vegetativos (FRV), sendo triplicada sua massa seca. Como já foi mencionado no

primeiro ano de experimento, essas folhas são importantes fontes de nutrientes para o próximo ciclo.

No caso de frutos (FR), observou-se no início pouco crescimento, sendo que neste período estão ocorrendo divisões celulares, onde há uma ausência de crescimento visível, sendo a partir de outubro até janeiro a fase de expansão celular (formação do endocarpo), com um aumento na massa seca em 430 DAI. Observou-se maior aumento em 491 DAI, onde os frutos reiniciam o crescimento após uma pausa de 15 dias, ocorrendo a granação e formação do endosperma que vai até março, dando então início a maturação dos frutos.

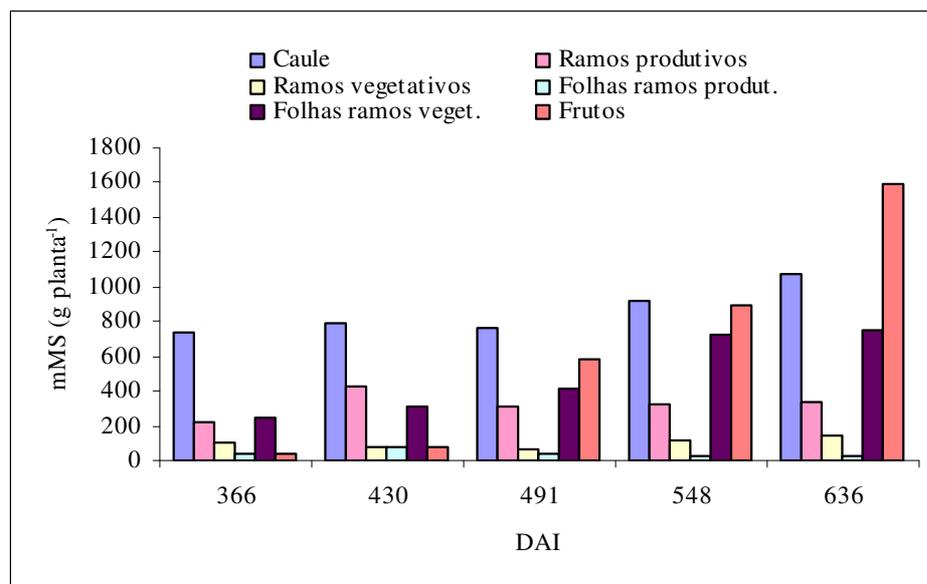


Figura 4.5. Massa de matéria seca dos diferentes compartimentos das plantas em todos os períodos estudados no 2º ano agrícola (2004/2005).

A mMS_7 total da parte aérea (C_7) do segundo ano agrícola também pode ser descrita pela equação 4.1, cujos parâmetros foram:

$$a = 1326,4219$$

$$b = 3062,5388$$

$$c = 173,83736$$

$$d = 53,734246$$

e um coeficiente R^2 de 0,9954, o que indica um bom ajuste dos dados experimentais ao modelo.

O fato do mesmo modelo (equação 4.1) ter se ajustado muito bem aos dois anos, pode-se dizer que o acúmulo de mMS_7 para o café, no período que vai da floração à maturação dos frutos, é sigmoïdal, como nas culturas anuais.

Como no 1º ano, a equação de mMS_7 em função de DAI possibilitou obtenção da taxa de crescimento do café do segundo ano agrícola, por meio da derivada de mMS_7/dt , também apresentada na Figura 4.6. A taxa foi crescente de DAI 366 (corresponde a 0 DAI na Figura 4.6) até DAI 540 (174 DAI da Figura 4.6) quando atingiu o máximo de $14,25 \text{ g planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, passando em seguida por decréscimos até a colheita em 636 DAI.

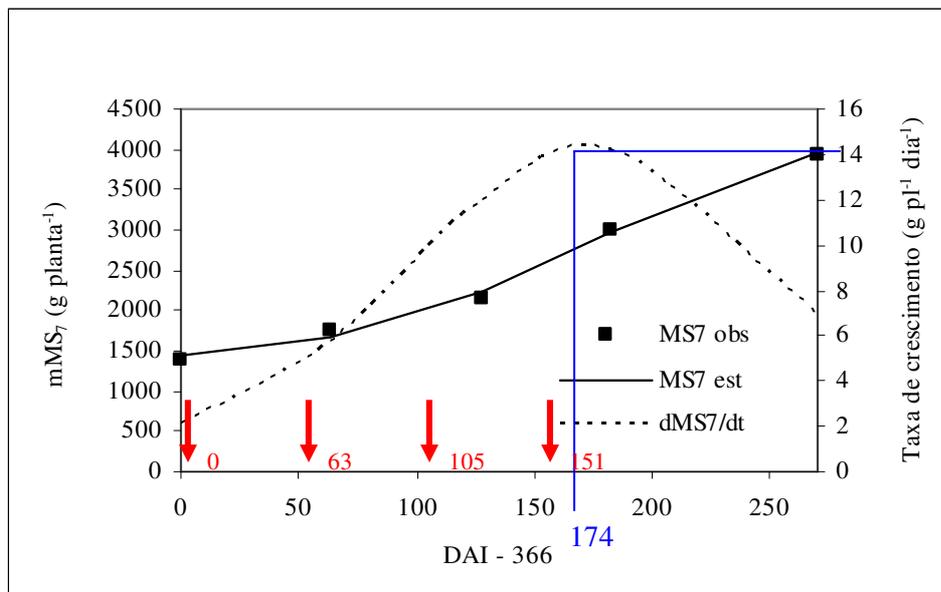


Figura 4.6. Variação da massa de matéria seca mMS do compartimento 7 no 2º ano agrícola, iniciando do zero (366 DAI = 0 DAI) para ajuste do modelo. Dados observados (pontos) e a estimativa (linha cheia) pela equação (4.1) e taxa de acúmulo (linha pontilhada) da mMS (dMS_7/dt) obtida pela derivação da equação (4.1). As setas vermelhas indicam as adubações, e as linhas azuis representam o ponto de taxa máxima de crescimento.

Na Tabela 4.11 estão os resultados de teor de N (%) nos diferentes órgãos da planta e em todas as épocas estudadas até a colheita. Em todos os períodos, os órgãos que apresentaram maior teor de N foram folhas de ramos vegetativos (FRV), folhas de ramos produtivos (FRP) e frutos (FR), sendo que em 636 DAI houve um decréscimo no teor de N em folhas, principalmente folhas de ramos produtivos (FRP). As causas destes decréscimos podem ser explicadas da mesma maneira como no ano anterior, por mecanismos de redistribuição do N na planta, diluições do N do fertilizante pelo N do solo e perdas de partes da planta antes da colheita.

Tabela 4.11 - Teor de N total (C_{Ni}) nos diferentes compartimentos da planta nos momentos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.

Compartimento	C_{Ni} (%)				
	366	430	491	548	636
C ₁ C	0,94±0,18	1,04±0,15	0,98±0,17	0,96±0,08	1,07±0,26
C ₂ RP	1,42±0,36	1,55±0,23	1,28±0,25	1,19±0,12	1,53±0,32
C ₃ FRP	2,30±0,49	3,01±0,13	2,78±0,11	2,56±0,15	2,33±0,15
C ₄ RV	2,02±0,49	2,15±0,16	1,68±0,59	1,88±0,21	1,74±0,28
C ₅ FRV	2,58±0,60	3,75±0,14	3,21±0,36	3,05±0,13	2,72±0,25
C ₆ FR	3,05±0,63	4,05±0,17	2,69±0,44	2,00±0,19	2,31±0,33
C₇ PA	1,49	1,91	1,95	1,85	1,96

Média de 5 repetições ± desvio padrão

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

C₇ = médias ponderadas em relação à matéria seca de cada compartimento

Com relação ao nitrogênio total acumulado nos diferentes órgãos (Tabela 4.12), observou-se aumentos expressivos em folhas de ramos vegetativos (FRV) e frutos (FR), onde juntos acumularam mais de 74% de todo o N presente na planta aos 636 DAI, sendo que neste período, estes órgãos estão crescendo e acumulando N por serem drenos principais. Folhas de

ramos vegetativos (FRV) acumularam 26,58% de N até o momento da colheita, sendo estes órgãos responsáveis pela produção do ano seguinte.

Calculando-se as quantidades relativas do conteúdo de N (NA_i) de cada compartimento, foi possível observar que caule (C), ramos produtivos (RP) e folhas de ramos produtivos (FRP) diminuíram seus teores de N no período, e provavelmente redistribuíram N para os frutos (FR), os quais aumentaram consideravelmente seu conteúdo de 6% em 366 DAI para 48% em 636 DAI. Folhas de ramos vegetativos (FRV) praticamente mantiveram seu conteúdo relativo durante todo o período estudado.

Tabela 4.12 - Nitrogênio acumulado (NA_i) nas diferentes partes da planta nos momentos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.

Compartimento	NA_i ($g\ planta^{-1}$)				
	366	430	491	548	636
C ₁ C	6,94	8,30	7,47	8,81	11,58
C ₂ RP	3,14	6,61	3,95	3,92	5,18
C ₃ FRP	0,99	2,53	1,06	0,75	0,50
C ₄ RV	2,01	1,54	1,11	2,12	2,54
C ₅ FRV	6,45	11,34	13,10	22,27	20,55
C ₆ FR	1,23	3,23	15,53	17,95	36,96
C₇ PA	20,76	33,55	42,22	55,82	77,31

Média de 5 repetições

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

Em relação aos dados de átomos % em excesso (Tabela 4.13), é importante estabelecer as condições iniciais do traçador isotópico. Neste segundo ano (1º setembro de 2004, DAI 366), a cultura estava exposta a duas fontes de ^{15}N : 1. Os resíduos marcados na própria planta, nas raízes, no solo e na serrapilheira, e 2. As novas aplicações de fertilizante ($350\ kg\ ha^{-1}$, com a mesma composição isotópica, 2,072%). Por isso, os cálculos de recuperação do N do fertilizante foram feitos de forma acumulada. Assim, a primeira aplicação do segundo ano

corresponde a quinta, tendo a planta recebido até esta data (DAI 366) $280 + 87,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, e assim sucessivamente. Assim procedendo, os resíduos marcados já estão contabilizados, pois sua origem está nos 280 kg ha^{-1} de N aplicados no 1º ano. Infelizmente, com esses procedimentos, a contribuição destes resíduos marcados não pode ser quantificada em separado. Observou-se que em todos os órgãos analisados houve aumento dos enriquecimentos em ^{15}N até 636 DAI, sendo os Frutos (FR) o compartimento de maior marcação, demonstrando serem um dreno principal de N do fertilizante neste ano até os 636 DAI. Folhas de ramos produtivos (FRP) apresentaram uma marcação mais alta neste ano, pelo fato de se constituírem de folhas de ramos vegetativos do ano anterior, já tendo recebido fertilizante marcado naquele ano.

Tabela 4.13 - Abundância Isotópica dos diferentes compartimentos da planta nos momentos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.

Compartimento	Átomos % em excesso de ^{15}N				
	366	430	491	548	636
C ₁ C	0,576±0,059	0,703±0,112	0,811±0,105	0,804±0,090	0,735±0,095
C ₂ RP	0,647±0,099	0,719±0,129	0,815±0,107	0,843±0,100	0,780±0,098
C ₃ FRP	0,766±0,123	0,785±0,173	0,740±0,067	0,866±0,136	0,847±0,115
C ₄ RV	0,621±0,119	0,781±0,143	0,787±0,173	0,954±0,104	0,814±0,118
C ₅ FRV	0,651±0,132	0,799±0,153	0,819±0,144	0,946±0,105	0,866±0,116
C ₆ FR	0,599±0,093	0,744±0,146	0,831±0,178	0,932±0,129	0,887±0,098
C₇ PA	0,610	0,733	0,816	0,887	0,829

Média de 5 repetições \pm desvio padrão

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

C₇ = médias ponderadas em relação à matéria seca de cada compartimento

Pelos resultados da Tabela 4.14 de QNddf_i observa-se que, com exceção de folhas de ramos produtivos, houve aumento em todas as partes da planta estudadas no que se refere a

quantidade de N do fertilizante absorvido, sendo que folhas de ramos vegetativos (FRV) absorveram maior quantidade, cerca de 27% do total absorvido pela planta.

Observa-se que em 366 DAI a planta absorveu 7,60 g planta⁻¹ de N das 36,76 g de N aplicadas no ano anterior. Em 430 DAI foi aplicada a 1ª parcela de adubação do 2º ano agrícola e neste período a planta tinha absorvido 14,82 g planta⁻¹ das (36,76 g planta⁻¹ + 11,48 g planta⁻¹) do N aplicado, o que corresponde a 31,7% do N do fertilizante aplicado. Em 491 DAI já haviam sido aplicadas 3 doses de N (36,76 + 34,44 g planta⁻¹) e a planta já tinha absorvido 20,27 g planta⁻¹ que corresponde a 28,5%. Em 548 as 4 aplicações do fertilizante já haviam sido aplicadas (36,76 + 45,92 g planta⁻¹) e a parte aérea absorveu 29,82 g planta⁻¹. Na colheita, em 636 DAI, a planta absorveu 38,48 g planta⁻¹, ou 46,5% do N aplicado.

Tabela 4.14 - Quantidade de N do fertilizante nas diferentes partes da planta nos períodos 366, 430, 491, 548 e 636 DAI.

Compartimento	<i>QNddf_i (g planta⁻¹)</i>				
	366	430	491	548	636
C ₁ C	2,34	3,43	3,55	4,16	4,99
C ₂ RP	1,19	2,79	1,89	1,94	2,37
C ₃ FRP	0,45	1,16	0,46	0,38	0,25
C ₄ RV	0,73	0,71	0,51	1,19	1,21
C ₅ FRV	2,46	5,32	6,29	12,35	10,44
C ₆ FR	0,43	1,41	7,56	9,81	19,22
C₇ PA	7,60	14,82	20,27	29,82	38,48

Média de 5 repetições

C-Caule; RP-Ramos Produtivos; FRP-Folhas de ramos produtivos; RV-Ramos vegetativos; FRV-Folhas de ramos vegetativos; FR-Frutos; PA-Total da parte aérea

Com os resultados da relação $QNddf_i/QNdds_i$ do 2º ano de experimento apresentados na Figura 4.7, pode-se observar que essa proporção aumentou até 548 DAI com um máximo de 1,15, onde 36,0% do fertilizante já tinha sido absorvido pela parte aérea da planta e as aplicações do fertilizante já tinham terminado. Com as Figuras 4.3 e 4.7

de QN_{ddf_i}/QN_{dds_i} dos 2 anos estudados, também é possível observar que a época de maior absorção de N pelas plantas também é a época de maior acúmulo de massa de MS, e que essa época corresponde ao mês de março. Cietto (1988) estudando o acúmulo de matéria seca e a absorção de macro e micronutrientes em plantas de café de 2 à 5 anos, verificou maior acúmulo de mMS e N simultaneamente, nas época julho, janeiro e junho.

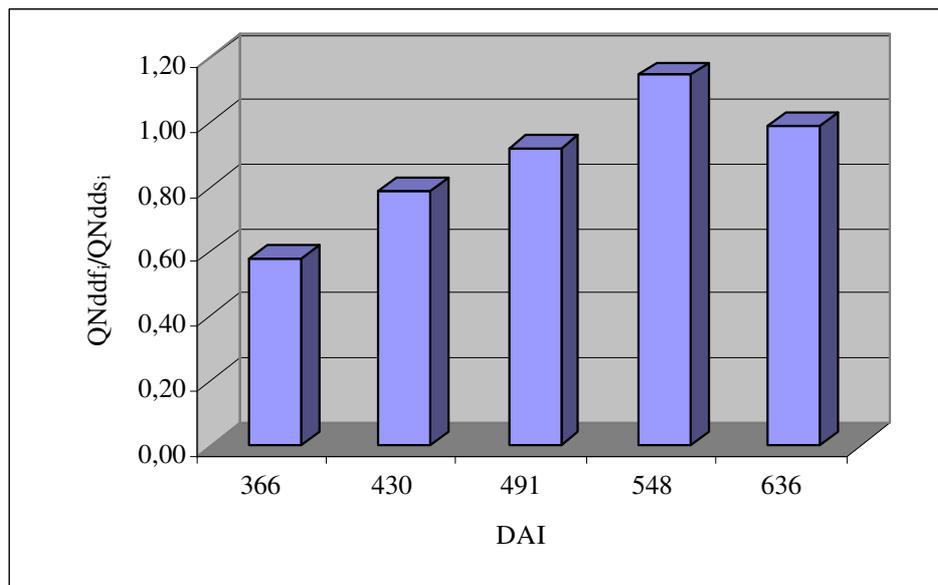


Figura 4.7. Relação QN_{ddf_i}/QN_{dds_i} em todas as épocas estudadas do 2º ano agrícola.

4.2.2 Balanço do Nitrogênio

Ao final do segundo ano do experimento (731 DAI), também foi fechado o balanço do N derivado do fertilizante aplicado nos 2 anos, para todos compartimentos do sistema solo-café-atmosfera, apresentado na Tabela 4.15, com dados expressos em $kg\ ha^{-1}$. Neste balanço também foram contabilizados os compartimentos da raiz, do solo, da volatilização, da lixiviação e os compartimentos 22 e 23 citados anteriormente. Como já mencionado, para

cálculos do balanço do N no café, foram utilizadas as quantidades de N do fertilizante aplicadas nos dois anos.

Tabela 4.15. Destino do N do fertilizante nos diferentes compartimentos, depois de dois anos de cultivo (DAI 731).

<i>Compartimento</i>		<i>kg ha⁻¹</i>	<i>%</i>
1	Caule	48,42 ± 8,99	7,69
2	Ramos Produtivos	22,30 ± 6,23	3,54
4	Ramos Vegetativos	19,87 ± 6,47	3,15
5	Folhas de Ramos Vegetativos	29,71 ± 14,17	4,72
7	Sub-total da parte aérea	120,30	19,10
8	Raiz da camada 0-0,2 m	36,25	5,75
9	Raiz da camada 0,2-0,4 m	8,62	1,37
10	Raiz da camada 0,4-0,6 m	7,37	1,27
11	Raiz da camada 0,6-0,8 m	4,83	0,77
12	Raiz da camada 0,8-1,0 m	2,32	0,37
13	Sub-total de raízes	59,39	9,43
14	Solo da camada 0-0,2 m	47,84	7,59
15	Solo da camada 0,2-0,4 m	14,55	2,31
16	Solo da camada 0,4-0,6 m	8,67	1,38
17	Solo da camada 0,6-0,8 m	2,53	0,40
18	Solo da camada 0,8-1,0 m	5,65	0,90
19	Sub-total de solo	79,25	12,58
20	Volatilização	(5,74+4,59) – (2,49+1,99)¹	1,64 – 0,71¹
21	Lixiviação	(8,09+ 6,47)	2,31
22	Serrapilheira	70,42	11,18
23	Exportação pelos grãos	(146,46+19,09)	26,28
24	Outros²	114,68	18,20
25	Total Geral	350,00 + 280,00	100,00

¹ Valor em vermelho é referente à reabsorção do N volatilizado pela parte aérea da planta

² Outros= valores de Ndff não estimados

Na parte aérea foi observada uma recuperação do N do adubo aplicado (280 kg ha⁻¹ no 1º ano e 350 kg ha⁻¹ no 2º) de 120,30 kg ha⁻¹, que corresponde a 19,10% do N aplicado, sendo que no final do segundo ano do experimento não havia os compartimentos 3 e 6,

correspondentes a folhas de ramos produtivos e frutos. A serrapilheira, que representa uma porção da parte aérea da planta presente até um certo momento, acumulou 11,18% do N aplicado, e portanto, servirá como fonte orgânica de N. A raiz absorveu 59,39 kg ha⁻¹, ou seja, 9,43% do N do fertilizante aplicado no período de 2 anos. No solo encontrou-se 79,25 kg de N ha⁻¹ que corresponde a 12,58% do N do sulfato de amônio aplicado, sendo a camada 0-0,2 m onde verificou-se a maior concentração do N do fertilizante. Tanto o N presente na serrapilheira, quanto o N do solo continuam à disposição da planta para o próximo ciclo.

4.3 Considerações gerais sobre os dois anos agrícolas.

4.3.1 Eficiência de utilização do fertilizante

Para uma visão geral do comportamento da cultura do café no período total, no que se refere aos aspectos de nutrição nitrogenada com ênfase no fertilizante marcado, construiu-se a Figura 4.8. Quanto à mMS, observa-se claramente as duas curvas sigmoidais que descrevem a fase que vai da floração à maturação (colheita) e os períodos pós-colheitas caracterizados por grandes perdas de folhas e frutos (exportação). A quantidade de N do fertilizante na parte aérea acompanha razoavelmente a matéria seca, principalmente no 2º ano. Os teores de N total oscilam em torno de 2,5%, com uma tendência de diminuição, provavelmente por diluição com a mMS, que cresceu bastante do 1º para 2º ano. O teor baixo de N em 0 DAI deve-se ao estado nutricional pobre no qual a cultura se apresentava no início. A composição isotópica do ¹⁵N acompanhou as adubações com fertilizante marcado, de forma mais pronunciada no 1º ano, em comparação ao 2º devido às altas taxas de crescimento das plantas neste período.

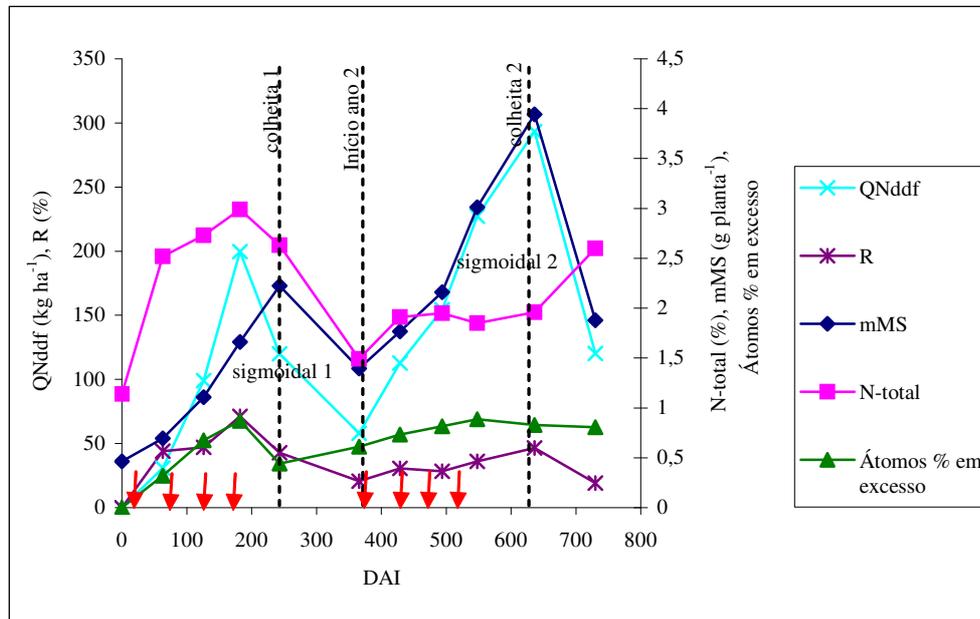


Figura 4.8. Evolução da massa de matéria seca (mMS), teor de nitrogênio na parte aérea (N%), enriquecimento isotópico (átomos % em excesso de ^{15}N), quantidade do nitrogênio da parte aérea derivada do fertilizante (QNddf kg ha^{-1}) e recuperação do fertilizante (R%) em função do tempo (DAI). As setas vermelhas indicam as adubações dos 2 anos agrícolas.

4.3.2 Produtividade do cafeeiro

Na Tabela 4.16 estão os resultados de produtividade dos dois anos agrícolas do tratamento T_2 (dose de 280 kg ha^{-1} no 1º ano e 350 kg ha^{-1} de N no 2º ano agrícola) e ainda os resultados das parcelas onde foram utilizadas doses zero (T_0) e $\frac{1}{2}$ dose (T_1). Observou-se que no 1º ano agrícola, não houve diferença na produtividade entre os tratamentos. Isto se deve a idade das plantas, de apenas 3 anos, ou seja, este cafezal ainda apresentava-se em formação. Outra explicação para a baixa produtividade é devida ao fato destas plantas, no início do experimento, não apresentarem um aspecto nutricional bom.

No segundo ano agrícola, observou-se uma grande diferença na produtividade, tanto no T_1 quanto no T_2 , devido a adubação do 1º ano estar se refletindo neste 2º ano. O tratamento

T₂ teve maior produtividade que T₁, e isso se deve a quantidade de N usada na adubação. Provavelmente essas plantas tiveram maior crescimento, principalmente de folhas, o que se reflete em maior número de flores e conseqüentemente em maior produção de grãos. Apesar de T₂ ter tido uma produção maior que T₁, a produção foi baixa, pelo fato do cafezal estar ainda em formação, e as quantidades de N acumuladas terem sido sempre crescentes, indicando que nos anos de baixa produção, o cafeeiro absorve N para produzir ou refazer a vegetação. As plantas ou absorvem os nutrientes para produzir grãos, ou para aumentar a vegetação para se prepararem para o próximo ano. Portanto, não se pode adubar pouco nos anos de baixa produção e nem adubar muito em anos de alta produção, visto que as necessidades de N são compensatórias.

Tabela 4.16. Produtividade do cafeeiro nos dois anos agrícolas estudados (2003/2004 e 2004/2005).

<i>Tratamentos</i>	<i>Café em côco</i>		<i>Café beneficiado</i>			
	<i>2003/2004</i>	<i>2004/2005</i>	<i>2003/2004</i>		<i>2004/2005</i>	
	<i>kg parcela⁻¹</i>		<i>g planta⁻¹</i>	<i>scs ha⁻¹</i>	<i>g planta⁻¹</i>	<i>scs ha⁻¹</i>
T ₀	0,5	0,8	30,5	3,9	38,7	4,9
T ₁	0,7	2,3	38,8	4,9	112,8	14,3
T ₂	0,7	11,0	38,1	4,8	625,3	79,4

A diferença na produtividade entre os tratamentos T₁ e T₂ evidencia a importância do fertilizante. Continua a dúvida de que uma dose ainda maior (1,5 T₂) no 2º ano, digamos de 440 kg ha⁻¹ de N, ainda teria uma resposta positiva. Os dados de aumento de matéria seca, suas taxas de crescimento ainda altas após a última aplicação de fertilizante aos 518 DAI, a redução da fração QNddf_i/QNdds_i aos 636 DAI e as baixas perdas por volatilização e lixiviação indicam que a sugestão de uma dose maior teria uma eficiência melhor. Viana et al.

(1985), estudaram os efeitos de doses de N (0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹) em Latossolo Vermelho cultivado com Catuaí em formação, e verificaram que o cafeeiro respondeu linearmente às doses de N, sendo que a maior produção correspondeu a uma dose de 400 kg ha⁻¹ e um teor foliar de N correspondente a 33 g kg⁻¹ de N.

Pela Figura 4.9 observa-se melhor as diferenças nas produtividades dos 3 tratamentos nos 2 anos agrícolas.

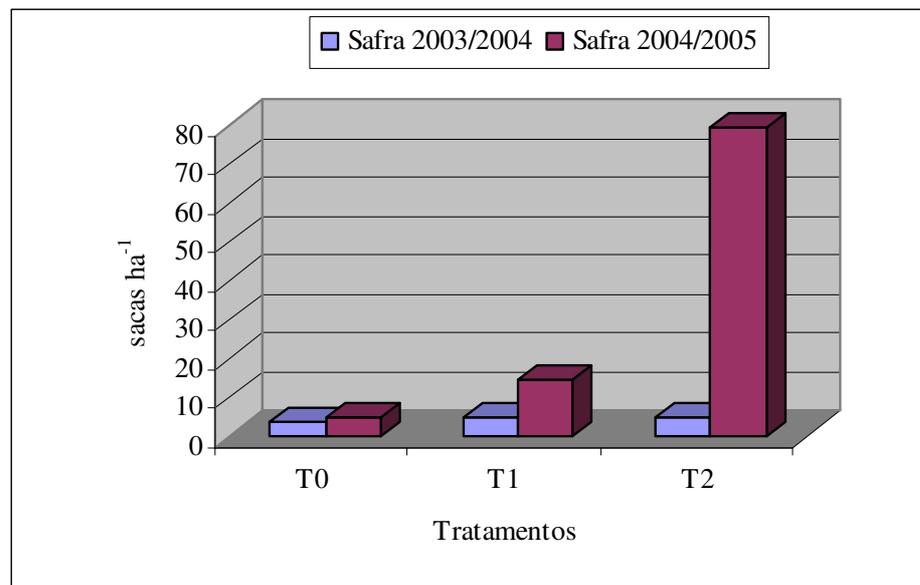


Figura 4.9. Produtividade do cafeeiro em sacas por hectare durante os dois anos agrícolas para os tratamentos T₀ (dose zero), T₁ (1/2 dose) e T₂ (dose de 280 kg ha⁻¹ no 1º ano e 350 kg ha⁻¹ de N no 2º ano agrícola).

4.3.3 Distribuição do nitrogênio na raiz

As Figuras 4.10 e 4.11 representam os valores percentuais médios da massa de matéria seca de raiz nas diferentes profundidades até 1,0 m e nas diferentes distâncias em relação ao tronco do cafeeiro, amostradas no final dos dois anos agrícolas nos DAI 366 e 731.

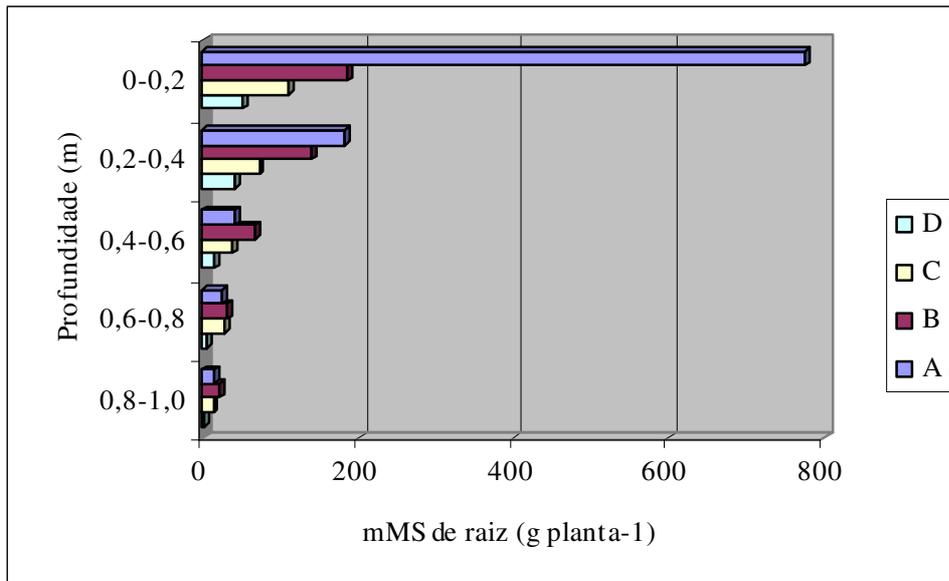


Figura 4.10. Massa de matéria seca (mMS) de raiz nas diferentes profundidades (0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8, 0,8-1,0 m) e distantes do caule (A = 0,15 cm, B = 33 cm, C = 56 cm= e D = 87,5 cm) em 366 DAI.

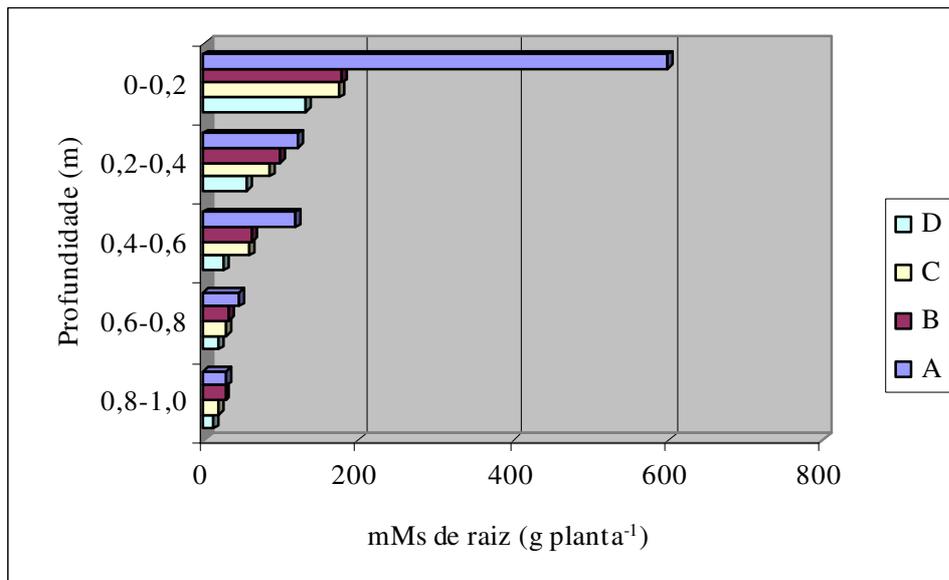


Figura 4.11. Massa de matéria seca (mMS) de raiz nas diferentes profundidades ((0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8, 0,8-1,0 m) e distantes do caule do cafeeiro (A = 0,15 cm, B = 33 cm, C = 56 cm= e D = 87,5 cm) em 731 DAI.

Pela Figura 4.10, pode ser observado que no primeiro ano, a massa de matéria seca de raiz era superior a massa de matéria seca da parte aérea, pelo fato de nesse ano à planta apresentar valores de massa de matéria seca de folhas inferior. A massa de matéria seca de

raiz do 1º ano representou 57% do total de massa seca da planta inteira, e a parte aérea 43%, sendo que 42% das raízes estavam próximas do caule e na profundidade de 0-0,2 m (60% das raízes estavam na profundidade de 0-0,2 m, e 55% das raízes estavam próximas do caule). Esses resultados estão coerentes com os encontrados na literatura, onde apontam que mais de 55% das raízes do cafeeiro se encontram próximas do caule e na profundidade de 0-0,2 m, mostrando também que o tipo de amostragem foi representativa e satisfatória para o proposto. Pereira da Costa (2006) apresenta valores de massa de matéria seca dos 2 tratamentos adicionais T₀ e T₁ e através destes resultados verificou-se que a massa de matéria seca de raiz do tratamento que recebeu N foi superior ao tratamento testemunha (dose zero de N) e superior ao tratamento que recebeu ½ dose, verificando a importância do nitrogênio para raiz.

No segundo ano de experimento, verificou-se um aumento na relação de massa de matéria seca da parte aérea em relação à massa de matéria seca de raiz, a parte aérea representou 50% e a raiz 50% do total da planta. Isso se deve ao fato do cafeeiro estar ainda em formação e com isso aumentando sua massa de MS da parte aérea. Cerca de 31% das raízes estavam próximas do caule e na profundidade de 0-0,2 m (57% na camada 0-0,2 m e 48% próximas ao caule na distância A).

4.3.4 Compartimento que melhor reflete a planta toda em termos de N total e composição isotópica

Devido a problemas de amostragem e do alto custo das análises de N-total e de ¹⁵N em plantas de café, seria de grande utilidade verificar que parte da planta representaria a planta toda para estes tipos de análises. Em nosso caso, estas análises foram feitas separadamente, com cinco repetições, em 9 datas no período de 2 anos, (Tabelas 4.2, 4.3, 4.10 e 4.12) em

amostras consideradas representativas. Elas constaram de um ramo de uma planta isotopicamente marcada, cujo 1º cm na inserção do caule foi denominada de caule (C), e as demais partes constaram de ramo produtivo (RP), folhas de ramos produtivos (FRP), ramos vegetativos (RV), folhas de ramos vegetativos (FRV) e fruto (FR), que constituem os compartimentos descritos no item 3.2. Com os dados de N-total e ^{15}N calculou-se médias ponderadas (MP) levando em consideração a massa da matéria seca de cada compartimento (mMS_i):

$$MP = \frac{\sum_{i=1}^6 [C_{N_i} \times mMS_i]}{\sum_{i=1}^6 mMS_i} \quad (4.2)$$

onde C_{N_i} é trocado por A_{N_i} para obtenção da MP para ^{15}N .

Para verificar qual compartimento melhor representa MP, foram feitas regressões lineares entre MP e C_{N_i} ou A_{N_i} , utilizando as nove amostragens feitas durante os dois anos. Estas regressões estão apresentadas na Figura 4.12. Considerando $MP = y$ e C_{N_i} ou $A_{N_i} = x$, o compartimento que melhor representaria MP seria aquele em que a regressão $y = ax + b$ teria o valor a mais próximo de 1 e o valor b o mais próximo de 0, pois assim teríamos $y = x$. Além disso, a regressão teria que ter um R^2 significativo e ser o maior de todos. Por estes critérios, as FRP apresentam a próximo de 1, b pequeno e um dos mais altos R^2 para C_N e, por isso, estas folhas poderiam ser utilizadas em análise foliar de N-total para efeito de adubação. As FRV apesar de apresentarem a praticamente igual a 1, seu b é grande e o R^2 menor que o das FRP.

Com respeito ao ^{15}N , dois compartimentos representam bem a MP da planta toda. O melhor seria o dos frutos (FR), com a desvantagem de não estarem presentes em todas as épocas e em segundo lugar vem o conjunto de ramos vegetativos (RV) e caule (C). Ramos vegetativos apresentam um $R^2 = 0,9604$, sendo uma boa opção de amostragem, podendo-se dessa forma utilizar esta parte da planta para fazer a análise conjunta de N-total e ^{15}N e ter uma boa estimativa para a planta toda, reduzindo assim a quantidade de amostras a serem coletadas e analisadas em experimentos futuros.

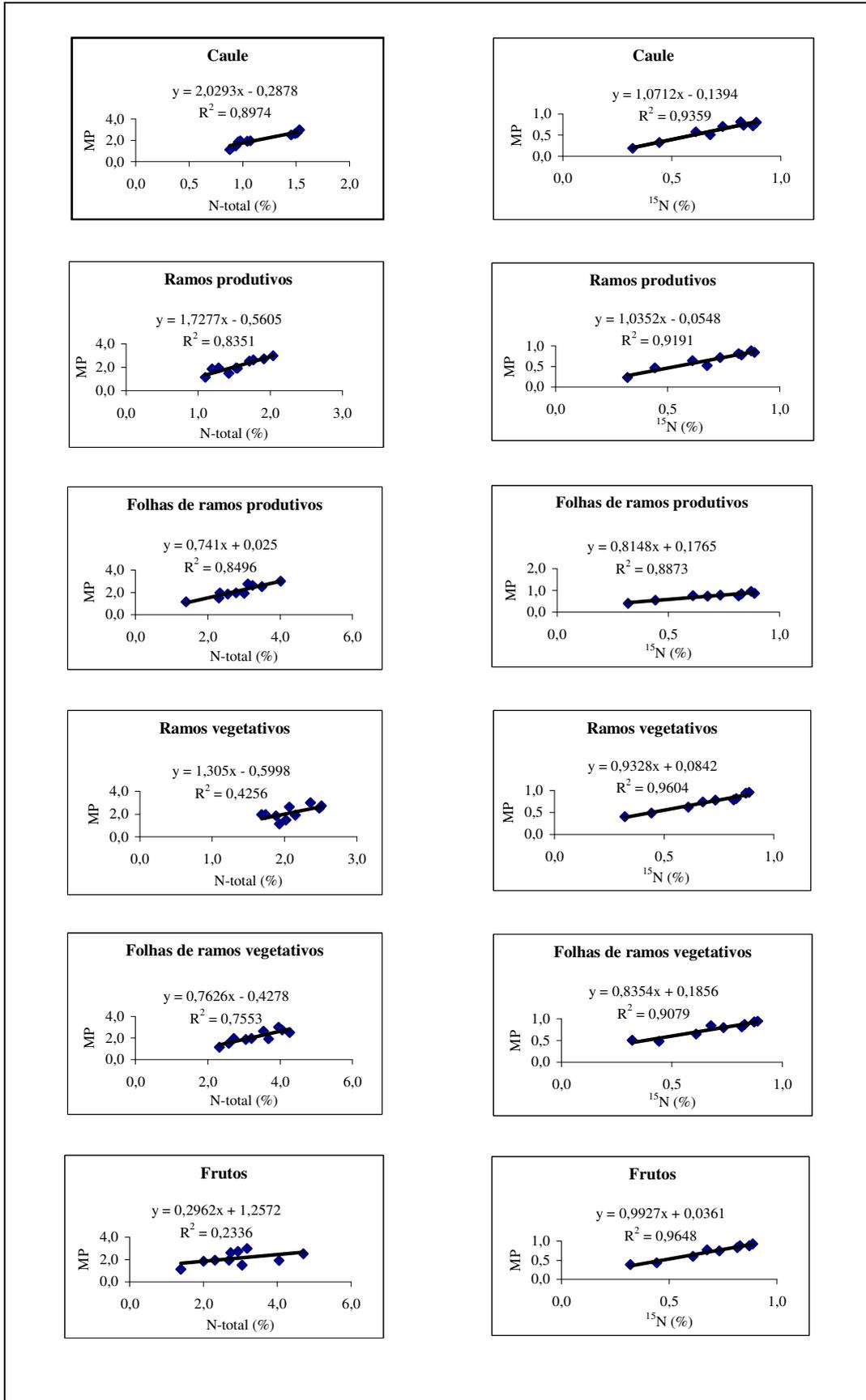


Figura 4.12. Regressões lineares entre a média ponderada MP (equação 4.2) e os valores de N-total e ^{15}N nas diversas partes da parte aérea do café, para todas as datas (9) de amostragem.

4.3.5 Considerações sobre os balanços de nitrogênio

Os balanços do N do fertilizante apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.15 apresentam valores médios mais desvios padrão, que indicam sua precisão. No compartimento 24 (Outros) vê-se que os balanços não se fecharam, no primeiro ano faltando 9,99% e no segundo 18,20%. No item 4.1.2.4 o compartimento 24 foi definido como valores não estimados ou avaliados e que podem bem justificar o não fechamento mencionado acima. Neste item, porém, gostaríamos de mostrar a dificuldade de estabelecer esse tipo de balanço, por causa da propagação de erros nos cálculos, principalmente para uma cultura perene de porte médio como a do café, cuja mMS assume valores significativos. Vejamos um exemplo, calculando o QNddf para o compartimento 1 (caule-C) aos DAI 731, utilizando as regras de propagação de erros:

$$mMS_1 = 1080,68 \text{ (g planta}^{-1}\text{)} \pm 186,01 \text{ (g planta}^{-1}\text{)}, CV = 17,21\%$$

$$C_{N1} = 1,23\% \pm 0,18\%, CV = 14,63\%$$

$$NA_1 = (mMS_1 \times C_{N1})/100 = (1080,68 \times 1,23)/100 = 13,29 \text{ g planta}^{-1} \text{ e considerando}$$

$$\text{que o erro de um produto } A \times B \text{ é } \sqrt{[s(A)]^2 + [s(B)]^2}, NA_1 = 13,29 \text{ g planta}^{-1} \pm 186,01$$

$$\text{g planta}^{-1}, CV = 1400\%$$

$$A_{N1} = 1,18\% \pm 0,11, CV = 9,3\%$$

$$Nddf_1 = (1,18 - 0,367)/(2,072 - 0,367) \times 100 = 47,68\% \pm 0,06\%$$

considerando os NA do fertilizante e os naturais como valores absolutos, sem erro.

$$QNddf_1 = NA_1 \times (Nddf_1/100) = 13,29 \times (47,68/100) = 6,34 \text{ g planta}^{-1} \pm 186,01 \text{ g planta}^{-1}$$

$$^1, CV = 2934\%$$

que é um erro absurdo, muito maior que o apresentado na Tabela 4.15 (8,99), calculando simplesmente pelo desvio padrão das 5 repetições de QNddf. Este exemplo é apresentado como um alerta na determinação da mMS, cujo erro é a principal causa dos erros dos cálculos que se sucedem e, também, como uma justificativa do não fechamento dos balanços. De qualquer forma, os balanços são bem representativos, uma vez que passados dois anos da aplicação de 630 kg ha^{-1} de sulfato de amônio, o balanço só não fechou por 18,20%.

4.3.6 Balanço Hídrico

Na Tabela 4.17 encontram-se os balanços hídricos completos de todo período. Eles dão uma visão global das relações hídricas ocorridas durante o período estudado da cultura. A chuva, o principal componente que determina a aptidão de certa região para uma cultura, acompanhou muito bem os valores históricos de precipitação em Piracicaba, que mostra que este período (Set 2003/Ago 2005) foi apenas levemente menos chuvoso que o normal. A irrigação nesta região, para a maioria das culturas perenes como o café, é suplementar e ocasional, pois o total de chuva está um pouco abaixo do limite estabelecido por Alfonsi (2000). Os 95,7 mm de irrigação foram aplicados durante os 2 anos apenas como uma prevenção para que as floradas no período de stress hídrico não fossem prejudicadas. Considerando o total de entradas (P+I), verifica-se que o RO representou apenas 0,3% do balanço, mostrando o ótimo controle desse componente nas condições experimentais avaliadas.

Já a drenagem Q_L abaixo da profundidade $z = 1,0 \text{ m}$ foi 14,6% de (P+I), o que não é muito mas que em anos mais chuvosos poderia alcançar uma percentagem maior. Em termos

de lixiviação de nitrogênio, que é um reflexo da drenagem, verificou-se que esta é pequena, podendo-se concluir que a adubação e seu parcelamento foram adequados em relação aos componentes do balanço hídrico. É importante, porém, lembrar da importância da drenagem profunda como fonte de água na manutenção de cursos de água e de aquíferos subterrâneos.

A variação ΔS deve ser pequena em relação aos demais componentes num período grande, em termos médios nunca maior que 125mm em termos absolutos para nosso solo.

A evapotranspiração real se aproximou da máxima praticamente o ano inteiro, exceção feita aos períodos secos (balanços 1, 2, 4, 23, 25, 26, 43, 44 e 45) quando as plantas perderam folhas porque a condutividade hidráulica do solo foi tão baixa a ponto do fluxo de água para as raízes não atender a demanda atmosférica.

Tabela 4.17 - Precipitação (P), irrigação (I), armazenamento inicial (Si), variação do armazenamento de água no solo (ΔS), escoamento superficial (RO), drenagem (Q_{Li}) e evapotranspiração real (ERi) e a evapotranspiração potencial ETc, para todos os períodos analisados. DAI = dias após o início

(continua)										
<i>Nº Balanço</i>	<i>Período</i>	<i>DAI</i>	<i>P</i> (mm)	<i>I</i> (mm)	<i>Si</i> (mm)	ΔS (mm)	<i>RO</i> (mm)	Q_{Li} (mm)	<i>ERi</i> (mm)	<i>ETc</i> (mm)
1	01/09 a 15/09	0_14	4,1	34,2	245,2	12,2	0,0	0,0	-26,1	-47,3
2	15/09 a 29/09	14_28	5,8	0,0	257,4	-6,1	0,0	0,0	-11,9	-57,7
3	29/09 a 13/10	28_42	77,8	0,0	251,3	26,6	-0,2	0,0	-50,9	-55,6
4	13/10 a 27/10	42_56	17,9	0,0	277,9	-6,9	0,0	0,0	-24,8	-67,5
5	27/10 a 10/11	56_70	25,3	0,0	271,0	-7,8	0,0	0,0	-33,1	-49,0
6	10/11 a 24/11	70_84	75,1	0,0	263,3	12,3	-0,4	0,0	-62,3	-62,3
7	24/11 a 08/12	84_98	89,7	0,0	275,6	17,5	-0,2	0,0	-72,0	-72,0
8	08/12 a 22/12	98_112	49,3	0,0	293,1	-8,2	0,0	0,0	-57,5	-57,5
9	22/12 a 05/01	112_126	85,6	0,0	284,9	17,0	-0,5	0,0	-68,1	-68,1
10	05/01 a 19/01	126_140	50,6	0,0	301,9	-1,7	-0,1	0,0	-52,2	-52,2
11	19/01 a 02/02	140_154	167,7	0,0	300,2	69,8	-0,6	-56,8	-40,5	-40,5
12	02/02 a 16/02	154_168	69,8	0,0	369,9	-26,0	-0,3	-31,5	-64,0	-64,0
13	16/02 a 01/03	168_182	152,9	0,0	344,0	21,1	-1,2	-82,3	-48,3	-48,3
14	01/03 a 15/03	182_196	73,1	0,0	365,1	-16,6	-0,4	0,0	-89,3	-89,3
15	15/03 a 29/03	196_210	14,0	0,0	348,5	-48,4	0,0	0,0	-62,4	-62,4
16	29/03 a 12/04	210_224	65,2	0,0	300,1	0,7	-0,3	0,0	-64,2	-64,2
17	12/04 a 26/04	224_238	52,3	0,0	300,8	0,5	-0,1	0,0	-51,7	-51,7

Tabela 4.17 - Precipitação (P), irrigação (I), armazenamento inicial (Si), variação do armazenamento de água no solo (ΔS), escoamento superficial (RO), drenagem (Q_{Li}) e evapotranspiração real (ERi) e a evapotranspiração potencial ETc, para todos os períodos analisados. DAI = dias após o início

<i>Nº Balanço</i>	<i>Período</i>	<i>DAI</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>Si</i>	ΔS	<i>RO</i>	<i>Q_{Li}</i>	<i>ERi</i>	<i>ETc</i>
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
18	26/04 a 10/05	238_252	23,2	0,0	301,3	-6,4	-0,1	0,0	-29,6	-29,6
19	10/05 a 24/05	252_266	25,5	0,0	294,9	-0,1	0,0	0,0	-25,6	-25,6
20	24/05 a 07/06	266_280	101,5	0,0	294,8	53,8	-0,8	-22,7	-24,2	-24,2
21	07/06 a 21/06	280_294	7,2	0,0	348,7	-12,4	0,0	0,0	-19,6	-19,6
22	21/06 a 05/07	294_308	1,9	0,0	336,2	-14,7	0,0	0,0	-16,5	-16,5
23	05/07 a 19/07	308_322	32,7	0,0	321,6	20,6	-0,1	0,0	-12,0	-12,0
24	19/07 a 02/08	322_336	44,6	0,0	342,2	-12,9	0,0	-20,7	-36,8	-36,8
25	02/08 a 16/08	336_350	0,0	0,0	329,3	-11,4	0,0	0,0	-11,4	-46,5
26	16/08 a 30/08	350_364	0,0	37,5	317,8	-8,9	-0,4	0,0	-46,1	-48,1
1_26	01/09 a 30/08	0_364	1312,8	71,6	-	63,7	-5,5	-214,1	-1101,2	-1268,7
27	30/08 a 13/09	364_378	0,0	0,0	308,9	-32,5	0,0	0,0	-32,5	-63,2
28	13/09 a 27/09	378_392	6,5	0,0	276,4	-19,9	0,0	0,0	-26,4	-55,6
29	27/09 a 11/10	392_406	60,2	4,9	256,5	25,1	0,0	0,0	-39,9	-51,0
30	11/10 a 25/10	406_420	117,1	0,0	281,7	72,1	-0,1	-3,5	-41,5	-41,5
31	25/10 a 08/11	420_434	11,8	0,0	353,8	-40,5	0,0	0,0	-52,2	-52,2
32	08/11 a 22/11	434_448	87,4	0,0	313,3	15,2	0,0	0,0	-72,1	-72,1
33	22/11 a 06/12	448_462	32,8	0,0	328,6	-40,3	0,0	0,0	-73,1	-73,1
34	06/12 a 20/12	462_476	18,9	0,0	288,3	-26,2	0,0	0,0	-45,1	-45,1
35	20/12 a 03/01	476_490	75,2	0,0	262,0	10,4	0,0	0,0	-64,8	-64,8
36	03/01 a 17/01	490_504	121,4	0,0	272,5	33,9	-0,4	-30,3	-56,8	-56,8
37	17/01 a 31/01	504_518	113,5	0,0	306,4	54,4	-0,1	-24,2	-34,8	-34,8
38	31/01 a 14/02	518_532	30,0	0,0	360,8	-59,3	0,0	0,0	-88,9	-88,9
39	14/02 a 28/02	532_546	46,5	0,0	301,6	-28,1	-0,1	0,0	-74,5	-74,5
40	28/02 a 14/03	546_560	1,4	0,0	273,5	-24,7	0,0	0,0	-26,1	-26,1
41	14/03 a 28/03	560_574	98,2	0,0	248,8	31,2	-0,1	-25,2	-41,8	-41,8
42	28/03 a 11/04	574_588	27,4	0,0	280,0	-14,7	0,0	0,0	-42,1	-42,1
43	11/04 a 25/04	588_602	0,0	0,0	265,3	-14,3	0,0	0,0	-14,3	-54,7
44	25/04 a 09/05	602_616	4,2	19,2	250,9	9,4	0,0	0,0	-14,0	-40,9
45	09/05 a 23/05	616_630	12,4	0,0	260,4	-2,3	0,0	0,0	-14,7	-46,7
46	23/05 a 06/06	630_644	148,2	0	258,1	47,5	0,0	-67,3	-33,4	-33,4
47	06/06 a 20/06	644_658	28,0	0	305,6	-4,5	0,0	0,0	-32,5	-42,7
48	20/06 a 04/07	658_672	20,2	0	301,1	9,2	0,0	0,0	-10,9	-34,0
49	04/07 a 18/07	672_686	0	0	310,3	-16,6	0,0	0,0	-16,6	-40,2
50	18/07 a 01/08	686_700	8,7	0	293,7	-6,5	0,0	0,0	-15,2	-38,5
51	01/08 a 15/08	700_714	0	0	287,2	-15,1	0,0	0,0	-15,1	0,0
52	15/08 a 29/08	714_728	23,3	0	272,1		0,0	0,0	-18,6	0,0
27_52	30/08 a 29/08	364_728	1093,3	24,1	-	-36,8	-0,8	-150,5	-997,7	-1214,6

5. CONCLUSÕES

O café Catuaí Vermelho, variedade IAC-44, dos 3 a 5 anos de idade, cultivado em condições climáticas normais de Piracicaba, SP, ao longo de curvas de contorno em Nitossolo Vermelho Eutroférico, A moderado e textura argilosa com 10% de declive, apresentou as seguintes características no que se refere à adubação nitrogenada:

1. Seu crescimento em termos de massa de matéria seca (mMS) foi sigmoidal em função do tempo, entre a floração (agosto/setembro) e a colheita (maio/junho), descrita pela equação:

$$mMS_t = a + \frac{b}{1 + e^{-\left(\frac{t-c}{d}\right)}}$$

com um decréscimo pronunciado de mMS até a próxima floração (agosto/setembro) devido à perdas de folhas e exportação de frutos.

2. A taxa de crescimento $d(mMS)/dt$ aumentou até o mês de fevereiro quando atingiu um máximo, mostrando que a aplicação das parcelas do adubo nitrogenado pode estender-se até fevereiro.

3. A parte aérea da planta durante o 1º ano, chegou a absorver 71% do N do adubo aplicado até março, esta porcentagem se reduziu até 34% na época da colheita e até 19% no início da nova floração. Esta diminuição ficou por conta de uma redistribuição do N para as raízes, perdas de folhas e frutos, e perdas de N pela parte aérea. No 2º ano, fazendo os cálculos de forma acumulada, isto é, considerando o adubo aplicado nos dois anos, a parte aérea chegou a absorver 36% do N do adubo até março, 47% na colheita e 19% no início da próxima floração. Estes dados indicam que as doses aplicadas (280 kg ha^{-1} de N em 4 parcelamentos

no 1º ano e 350 kg ha⁻¹ em 4 parcelamentos no 2º ano, na forma de sulfato de amônio) foram adequadas neste estágio da cultura.

4. Balanços do destino do N do fertilizante feitos ao final de cada ano agrícola (31 de agosto) mostram que, aproximadamente, 20% se encontraram na parte aérea, 12% nas raízes, 15% no solo. A serrapilheira, constituída de folhas caídas ao chão continham 28% do N do adubo no 1º ano e apenas 11% no segundo, no qual houve grande translocação de N para os frutos (ano de alta produção), tendo sido exportados 23% do N do adubo aplicado nos dois anos. Perdas por lixiviação e volatilização foram muito pequenas, da ordem de 2% cada em cada um dos anos.

5. Dados de concentração de N e de abundância isotópica de ¹⁵N, medidos de 60 em 60 dias em várias partes da planta, indicam a grande mobilidade do N, indo suprir necessidades deste elemento onde necessário.

6. Estudo simultâneo, na mesma cultura, mostrou que 43% do N volatilizado do solo proveniente do fertilizante foram reabsorvidos pelas plantas de café.

7. O enriquecimento de 2% em ¹⁵N do sulfato de amônio foi suficiente para o presente estudo, que envolveu uma cultura perene como a do café, que ao final atingiu mais de 2 m de altura, em condições de campo.

8. O método de amostragem para N total e ¹⁵N, através da coleta de um ramo inteiro na parte central da planta, mostrou-se perfeitamente adequado. Devido ao alto custo destas análises, a redução do número de amostras em experimentos futuros é desejável e, neste sentido, verificou-se que o conjunto das folhas de ramos produtivos e ramos vegetativos, representam bem a planta inteira para estes dois tipos de análise. Esta amostragem evita a coleta de um ramo completo.

9. A produtividade do cafeeiro foi dependente da dose de N aplicada.

10. O uso de sulfato de amônio na adubação do cafeeiro se mostrou uma boa opção, devido a menores perdas de N por volatilização e lixiviação no sistema solo-planta-atmosfera, aumentando sua eficiência.

11. A relação entre a mMS da parte aérea e a mMS de raiz neste período de formação representam 50% para cada um.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUNDA, E.M.W.O.; IMBAMBA, S.K.O.; KUMAR, D. High density plantings of coffee. I. Microclimatic and related changes. **East African Agricultural and Forestry Journal**, Nairobi, v.45, p.130–132, 1979.

ALFONSI, R.R. Histórico climatológico da cafeicultura brasileira. **Informativo Garcafé**, maio 2000. Disponível em: <http://www.Coffeebreak.com.br/o cafezal.asp?SE=8&ID=67>. Acesso em: setembro/2005.

AMARAL, J.A.T.; RENA, A.B.; BARROS, R.S.; ALVES, J.D. Periodicidade de crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e suas relações com fontes de nitrogênio, fotossíntese e redução do nitrato. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 14.; CONGRESSO LATINO AMERICANO DE TECNOLOGIA CAFEEIRA, 1., 1987. Campinas. **Resumos...** Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio/IBC, 1987. p.118-120.

AMARAL, J.A.T. **Crescimento vegetativo estacional do cafeeiro e suas inter-relações com fontes de nitrogênio, fotoperíodo, fotossíntese e assimilação do nitrogênio**. 1991. 139 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

ANJOS, J.T.; TEDESCO, M.J. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. **Científica**, Jaboticabal, v.4, p.49-55, 1976.

BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (Ed.) **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p.1-46.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.105-112, 1997.

BERTOLINI, C.G. **Eficiência do método de adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia-preta**. 2000. 48 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BOARETTO, A.E.; SCHIAVINATTO NETO, P.; MURAOKA, T.; TRIVELIN, P.C.O.; BISSANI, C.A. Eficiência da aplicação de ¹⁵N-uréia no solo e nas folhas de laranjeiras jovens. **Laranja**, Cordeirópolis, v.20, n.2, p.477-498, 1999a.

BOARETTO, A.E.; SHIAVINATTO-NETO, P.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O. Fertilização foliar de nitrogênio para laranjeira em estágio de formação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 621–626, 1999b.

BOUWEESTER, R.J.B.; VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, n.2, p.376-381, 1985.

BUSTAMANTE, C.; OCHOA, M.; RODRIGUEZ, M.I. Balance of three nitrogen ¹⁵N fertilizers in a Cuban Oxisol cultivated with *Coffea arabica* L. **Tropicultura**, Brussel, v.15, n.4, p.169-172, 1997.

CAMARGO, P.B.; TRIVELIN, P.C.O.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O. Destino do N de fertilizantes-¹⁵N (uréia e aquamônia) aplicados na cultura da cana-de-açúcar. I. Deslocamento no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 22., 1989, Recife. **Resumos...** Recife: SBCS, 1989. p.70-71.

CATANI, R.A.; MORAES, F.R.P. A composição química do cafeeiro. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v.1, p.45-57, 1958.

CHAVES, J.C.D. **Concentração de nutrientes nos frutos e folhas e exportação de nutrientes pela colheita durante um ciclo produtivo do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuai)**. 1982. 131 f. Dissertação (Mestrado, Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

CIETTO, S. **Acumulação de material seca, recrutamento de macro e micronutrientes pelo cafeeiro (*Coffea Arabica* L. Cv. Catuai) com dois, três, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granação e maturação, vegetando em um latossolo**. 1988. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

CORSI, M. Uréia como fertilizante na produção de forragem. In: PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C. de; FARIA, V.P. de (Ed.) **Uréia fertilizante**. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 1994. p.239-267.

FAVARIN, J.L. **A cultura do cafeeiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 45p. (Apostila).

FEIGENBAUM, S.; BIELORAI, H. ERNER, Y.; DASBERG, S. The fate of ¹⁵N labeled nitrogen applied to mature citrus trees. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.97, p.179-187, 1987.

FENILLI, T.A.B.; BOARETTO, A.E.; BENDASSOLLI, J.A.; TRIVELIN, P.C.O.; MURAOKA, T. Dinâmica do nitrogênio em laranjeiras jovens cultivadas em solução nutritiva. **Laranja**, Cordeirópolis, v.25, n.2, p.461-472, 2004.

FNP Consultoria & Comércio. **Agrianual 2004**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2004. 536 p.

FRANCO, C.M. Fisiologia do cafeeiro. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE POTASSA. **Cultura e adubação do cafeeiro**. 2. ed. São Paulo, 1965.

FRENEY, J.R.; DENMEAD, O.T.; WOOD, A.W.; SAFFIGNA, P.G.; CHAPMAN, L.S.; HAM, G.J.; HURNEY, A.P.; STEWART, R.L. Factors controlling ammonia loss from trash covered sugarcane fields fertilized with urea. **Fertilizer Research**, The Hague, v.31, p.341-349, 1991.

GALLO, P.B.; Van RAIJ, B.; GUAGGIO, J.A.; PEREIRA, L.C.E. Resposta de cafeeiros adensados à adubação NPK. **Bragantia**, Campinas, v.58, n.2, p.341-351, 1999.

GARCIA, A.W.R. **Determinação da saturação de potássio ideal para a cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em solos com diferentes valores para a capacidade de troca catiônica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 25., 1999, Franca. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1999. p. 329-330.

HARDARSON, G. **Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships**. Vienna: IAEA, 1990. 223 p. (Training Course Series, 2).

HOLTAN-HARTWIG, L.; BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences**, Aas, v.14, p.1-41, 1994. Supplement.

HUTCHINSON, G.L.; MILLINGTON, R.J.; PETERS, D.B. Atmospheric ammonia: Absorption by plant leaves. **Science**, Washington, v.175, p.771-772, 1972.

JANZEN, H.H.; BRUINSMA, Y. Methodology for the quantification of root and rhizosphere nitrogen dynamics by exposure of shoots to ¹⁵N-labeled ammonia. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.21, p.186-196, 1989.

KHANIF, Y.M. Ammonia volatilization from Malaysian soils following application of urea. **Pertanika**, Pertanian, v.15, p.115-120, 1992.

KELLER, G.D.; MENGEL, D.B. Ammonia Volatilization from Nitrogen Fertilizers Surface Applied to No-till Corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p.1060-1063, 1986.

KÜPPER, A. Consumo mensal de nitrogênio pelo cafeeiro: quantidade época e modo de adubação nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 4., 1976, Caxambu. **Resumos...** Caxambu: IBC/GERCA, 1976. p.215-217.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, p.345-352, 1990.

LARA CABEZAS, W.A.; KORNDÖRFER, G.H.; MOTTA, S.A.R. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho. II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.489-496, 1997.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; SANTANA, D.G.; GASHO, G.J. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.30, n.3/4, p.389-406, 1999.

LAZZARINI, W.; MORAES, F.R.P. de. Ensaio qualitativo, quantitativo, e de fracionamento de nitrogênio. In: LAZZARINI, W.; MORAES, F.R.P. de.; MORAES, M.V.; TOLEDO, S.V. **Experimentação cafeeira 1929-1963**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1967. p.178-183.

LEA-COX, J.D.; SYVERTSEN, J.P.; GRAETZ, D.A. Springtime ¹⁵nitrogen uptake, partitioning, and leaching losses from young bearing citrus trees of differing nitrogen status. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, Geneva, v.126, p.242-251, 2001.

LEGAZ, F.; PRIMO-MILLO, E.; PRIMO-YUFERA, E.; GIL, C.; RUBIO, J.L. Nitrogen fertilization in citrus. I. Absorption and distribution of nitrogen in calamondin trees (*Citrus mitis* Bl.) during flowering, fruit set and initial fruit development periods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.66, n.3, p.339-351, 1982.

LEGAZ, F.; SERNA, M.D.; PRIMO-MILLO, E. Mobilization of the reserve N in citrus. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.173, p.205-210, 1995.

LIBARDI, P.L. **Balço de nitrogênio em culturas agrícolas e desvios encontrados na sua quantificação**. 1984. 113 f. Tese (Livre - Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1984.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Destino da uréia aplicada a um solo tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.2, p.34-40, 1978.

LIGHTNER, J.W.; MENGEL, D.B.; RHYKERD, C.L. Ammonia Volatilization from Nitrogen Fertilizer Surface Applied to Orchardgrass Sod. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, p.1478-1482, 1990.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, E. (Ed.) **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1986. p.165-274.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas e máximas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1993. 210p.

MARTINS, M. Doses e parcelamento de adubação nitrogenada e potássica na formação do cafeeiro em solos de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS. 9., 1981, São Lourenço. **Resumos...** Rio de Janeiro: IBC, GERCA, 1981. p.378-381.

MATIELLO, J.B.; CARVALHO, F. Pesquisa cafeeira-Contribuição marcante para o desenvolvimento da cafeicultura. In: MALAVOLTA, E.; YAMADA, E.; GUIDOLIN, J.A. (Coord.) **Nutrição e adubação do cafeeiro**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1981. p.1-8.

MATTIELLO, J.B.; FIGUEIREDO, J.P.; SANTINATO, R.; BARROS, U.V. Parcelamento da adubação NPK pós-colheita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS. 10., 1983, Poços de Caldas. **Resumos...** Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1983. p.23-24.

MATTSSON; M.; SCHJOERRING, J. K. Characteristics of ammonia emission from barley plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v.34, n.5, p.691-696, 1996.

MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.83-88, 1980.

MENGEL, D. Manejo de nutrientes na cultura do milho de alta produtividade. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.73, p.1-16, 1996.

MOHR, H.; SCHOPFER, P. **Plant physiology**. Berlin: Springer, 1995. 629p.

MORAES, F.R.P.; CATANI, R.A. Absorção de elementos minerais pelo fruto do cafeeiro durante formação. **Bragantia**, Campinas, v.23, n.26, p.331-336, 1964.

MORAES, F.R.P. de; REIS, A.J.; CERVellini, G.S. Doses e fracionamento do nitrogênio na adubação do cafeeiro. I. Latossolo roxo de Ribeirão Preto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS. 6., 1978, Ribeirão Preto. **Resumos...** Rio de Janeiro: IBC, GERCA, 1978. p.76-77.

MULVANEY, R.L. Mass spectrometry. In: KNOWLES, R.; BLACKBURN, T.H. **Nitrogen isotope techniques**. San Diego: Academic Press, 1993. p.11-57.

MUZZILI, O. A influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, n.1, p.95-102, 1983.

NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.; REICHARDT, K. An emerging technology for scaling field soil water behavior. In: SPOSITO, G. (Ed.) **Scale dependence and scale invariance in hydrology**. 1. ed. Nova York: Cambridge University Press, 1998. p.136-166.

NUTMAN, F.J. The root system of *Coffea arabica* L. II The effect of some soil conditions in modifying the "normal" root system. **Empire Journal of Experimental Agriculture**, Oxford, v.1, p.285-296, 1933.

PEREIRA da COSTA, F.M. **Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro sob efeito da adubação nitrogenada**. 2006. 80 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JUNIOR, M.J.; THOMAZIELLO, R.A.; CAMARGO, M.B.P. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.3, p.499-505, 2003.

PING, J.; BREMER, E.; HENRY JANZEN, H. Foliar uptake of volatilized ammonia from surface-applied urea by spring wheat. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.31, p.165-172, 2000.

PRADO, R.M de; NASCIMENTO, V.M. **Manejo da adubação do cafeeiro no Brasil**. Ilha Solteira: UNESP/FEIS, 2003. 274p.

RAIJ, B.Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC; Fundação IAC, 1996. 285p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ/USP – Departamento de Ciências Exatas, 1986. 513p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 1. ed. Barueri: Manole, 2004. 478p.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MEIRELLES, N.M.F.; FERREYRA, F.F.; ZAGATTO, E.A.G.; MATSUI, E. Extração e análise de nitratos em solução do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.1, p.130-132, 1977.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; URQUIAGA, S.S. **The fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics**. Vienna: IAEA, 1982. p.277-289. (SM - 263/36).

RENA, A.B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade do cafeeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1986. p.13-85.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p.119-147.

RENA, A.B.; NACIF, A.P.; GONTIJO, P.T.G.; PEREIRA, A.A. Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1996, Londrina. **Anais...** Londrina: IAPAR, 1996. p.72-85.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

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

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH V.A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.1, p.65-70, 2003.

SANZONOWICZ, C.; SAMPAIO, F.B.R.; NAZARENO, R.B.; TOLEDO, P.M.R.; SILVA, D.T.M. Fonte, doses e modos de aplicação de nitrogênio na produção do cafeeiro em solo de cerrado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Anais...**Brasília: Embrapa, 2001. p.169-170.

SILVA, A.L. **Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estudo de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil**. 2005. 72 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA, O.A.; SANTINATO, R.; FIGUEIREDO, J.P.; BARROS, U.V. Parcelamento fracionado do nitrogênio na adubação do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 11., 1984, Londrina. **Resumos...** Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio, 1984. p.287-289.

SNOECK, D.; DOMENACH, A.M. Demonstrating nitrogen transfer from legumes to coffee using isotope techniques. In: DIX-HUITIEME COLLOQUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL SUR LE CAFÉ, Helsinki, Finland, 1999. Paris: Association Scientifique Internationale du Café (ASIC), 1999. p.430-437.

SNOECK, D.; GANRY, F.; JADIN, P.; BEUNARD, P.; DOMENACH, A.M.; MPEPEREKI, S.M.; MAKONESE, F.T. Study of nitrogen fixing capacities of leguminous plants in coffee plantations in Burundi and their transfer possibilities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE AFRICAN ASSOCIATION FOR BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION, 6., 1994, Harare, Zimbabwe. **Harnessing biological nitrogen fixation in African agriculture: challenges and opportunities; selected papers**. Harare, Zimbabwe: University of Zimbabwe, 1998. p.232-239.

SOMMER, S.G.; JENSEN, E.S.; SCHJORRING, J.K. Leaf absorption of atmospheric ammonia emitted from pig slurry applied beneath the canopy of winter wheat. **Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science**, London, v.43, p.21-24, 1993.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Plant physiology**. California: The Benjamin/Cummings, 1991. 559p.

TERMAN, G.L. Volatilization of nitrogen as ammonia from surface applied fertilizers, organic amendments, and crop residues. **Advances in Agronomy**, v.31, p.189-223, 1979.

TRIVELIN, P.C.O.; SALATI, E.; MATSUI, E. **Preparo de amostras para análise de ^{15}N por espectrometria de massas**. Piracicaba: CENA, 1973. 41p.(Boletim Técnico, 2).

TRIVELIN, P.C.O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; BOARETTO, A.E. Dinâmica do nitrogênio de fertilizantes fluidos no sistema solo-planta. In: VITTI, G.C.; BOARETTO, A.E. (Coord.). **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: POTAFÓS, 1994. p.314-330.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J. de C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.2, p.193-201, 2002.

VAAST, P.; ZASOSKI, R.J.; BLEDSOE, C.S. Effects of solution pH, temperature, nitrate/ammonium rates and inhibitors on ammonium and nitrate uptake by Arabica coffee in short term solution culture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.21, n.7, p.1551-1564, 1998.

VIANA, A.S. Estudo de doses e parcelamentos de N e K na formação do cafeeiro em Led e Ter. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS. 8., 1980, Campos do Jordão. **Resumos...** Rio de Janeiro: IBC, GERCA, 1980. p.205-211.

VIANA, A.S.; MIGUEL, A.E.; LACERDA, M.P. Doses e parcelamento de adubação nitrogenada e potássica para formação e produção do cafeeiro em solos do cerrado II. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 14.; CONGRESSO LATINOAMERICANO DE TECNOLOGIA CAFEEIRA, 1., 1987, Campinas. **Resumos...** Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio; IBC, 1987. p.249-252.

VIANA, A.S.; MIGUEL, A.E.; CORRÊA, J.B.; LACERDA, M.P.; FIORAVANTE, N. Doses e parcelamento de adubação nitrogenada e potássica para formação e produção do cafeeiro em solos do cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 12., 1985, Caxambu. **Resumos...** Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio; IBC, 1985. p.146-148.

WALLACE, A.; ZIDAN, Z.I.; MUELLER, R.T.; NORTH, C.P. Translocation of nitrogen in citrus trees. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Geneva, v.64, p.87-104, 1954.

ZHANG, S.L.; CAI, G.X.; WANG, X.Z.; XU, Y.H.; ZHU, Z.L.; FRENEY, J.R. Losses of urea-nitrogen applied to maize grown on a calcareous fluvo-aquic soil in North China Plain. **Pedosphere**, Beijing, v.2, p.171-178, 1992.