

Manuel Ângelo Rosa Rodrigues

GESTÃO DO AZOTO NA CULTURA DA BATATA:

**ESTABELECIMENTO DE INDICADORES DO ESTADO NUTRITIVO
DAS PLANTAS E DA DISPONIBILIDADE DE AZOTO NO SOLO**



**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
VILA REAL, 2000**

Este trabalho foi expressamente elaborado como dissertação original para efeito de obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola, de acordo com o disposto no Decreto-Lei 216/92 de 13 de Outubro.

Agradecimento

Ao Sr. Presidente do Instituto Politécnico de Bragança, Professor Catedrático Dionísio Afonso Gonçalves, e aos sucessivos Presidentes do Conselho Directivo da Escola Superior Agrária, Professores Tomás de Figueiredo e Orlando Rodrigues, quero expressar o meu reconhecimento pela orientação que têm sabido dar à instituição e por terem proporcionado os meios necessários à minha contínua valorização académica e profissional.

Ao Sr. Professor João Coutinho, Catedrático na UTAD pelo departamento de Edafologia e orientador científico da tese, agradeço, em primeiro lugar, a amizade, o estímulo e a motivação. O seu contributo foi ainda decisivo na elaboração e em todos os ajustamentos posteriores do plano de trabalho. Estiveram a seu cargo grande número de determinações analíticas, realizadas no laboratório de edafologia pelo qual é responsável. Contribuiu com material bibliográfico, ensinamentos e sugestões diversas e, sobretudo, com a perspicácia e oportunidade das suas observações. Na fase final corrigiu o manuscrito, sugerindo alterações que muito terão contribuído para alguma qualidade que o trabalho possa apresentar.

À Sra. Engenheira Margarida Arrobas, na qualidade de responsável pelo laboratório de solos da Escola Superior Agrária de Bragança (ESAB), no qual decorreram grande parte dos trabalhos da tese, agradeço as inúmeras facilidades concedidas no laboratório e o seu auxílio em diversas determinações analíticas.

Ao Sr. Professor Quelhas dos Santos, Catedrático pelo Departamento de Química Agrícola e Ambiental do Instituto Superior de Agronomia, agradeço o incentivo e a proximidade que sempre mostrou ter pelo nosso trabalho. Agradeço ainda a competente revisão do manuscrito e as sugestões de correcção que nos transmitiu.

Ao Sr. Professor Fernando Martins, responsável pelo projecto de investigação que suportou grande parte das despesas da tese, agradeço as diversas sugestões que contribuíram para melhorar o delineamento experimental e a precisão de algumas determinações de campo e laboratoriais. Disponibilizou ainda imenso material bibliográfico e a sua amizade foi um estímulo precioso para ultrapassar algumas das etapas difíceis deste trabalho.

À Sra. Rita Diz, Técnica Profissional Principal, do laboratório de solos da ESAB e às Sras. Ana Veiga Pinto, Técnica Profissional Principal, e Ana Isabel Morais, Auxiliar Técnica, do laboratório de nutrição animal da ESAB, agradeço a disponibilidade, o zelo e a prontidão demonstrada sempre que foi solicitado o seu auxílio. Ao Sr. José Rocha, Técnico Profissional Principal, da Unidade de Experimentação Agro-pecuária, agradeço o auxílio prestado nalgumas determinações de campo e laboratoriais. Ao Sr. Engenheiro Telmo Roque, responsável pela Unidade de Experimentação Agro-pecuária da ESAB, agradeço as facilidades concedidas na alteração da rotação de culturas.

Por fim, a referência mais importante. À Margarida Arrobas, minha mulher, agradeço a paciência, a compreensão e o apoio. A dedicatória vai para a Inês Maria e para o João Pedro, os meus filhos, que suportaram, durante todo este tempo, a menor disponibilidade do pai. A eles agradeço o estímulo. Por eles, desistir nunca foi uma hipótese colocada.

Financiamento

Os trabalhos que conduziram à elaboração desta tese foram parcialmente financiados pelos projectos:

PAMAF I & D 6107 – Redução dos custos de produção e do impacte ambiental da cultura da batata;

PRAXIS P/AGR/11045/98 – Estudo de diferentes técnicas para avaliação do azoto potencialmente disponível para as culturas a partir de resíduos orgânicos incorporados ao solo; e

Programa PRODEP (medida 5, acção 5.2) – Financiamento à formação avançada no ensino superior.

Alguns dos resultados presentes neste trabalho foram já anteriormente publicados, de acordo com as seguintes referências:

- Rodrigues, M. A., F. Martins and J. Coutinho. 1998 b. Influence of mineral and organic nitrogen on tuber dry matter and specific gravity of potatoes. p. 265-266, vol I. Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia. (incluiu a apresentação de um painel)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho e F. Martins. 1998 a. Metodologias expeditas para maximizar a eficiência da fertilização azotada. p. 37-50. Actas do VII Colóquio Nacional de Produção de batata. Associação Portuguesa de Horticultura. Oliveira do Bairro. (incluiu uma comunicação oral)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho and F. Martins. 1999. Efficiency of organic nitrogen fertilisation of field vegetables crops in Northeast Portugal. Acta Horticulturae (em publicação)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho e F. Martins. 2000. Eficácia do triticales como cultura intercalar na recuperação de azoto residual. Actas do Encontro Anual da Ciência de Solo. Évora. (resumo + apresentação de painel)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho, F. Martins e J. C. Soutinho. 2000. Fertilização azotada da batateira. Produtividade e aspectos qualitativos da cv. Désirée. Actas do Encontro Anual da Ciência de Solo. Évora. (resumo + apresentação de painel)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho, F. Martins e M. Arrobas. 2000. Avaliação da disponibilidade de azoto com base em ensaios de incubação *in situ*. Actas do Encontro Anual da Ciência de Solo. Évora. (resumo + comunicação oral)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho, M. Arrobas e F. Martins. 2000. Avaliação da disponibilidade de azoto da ureia e de correctivos orgânicos. Actas do Encontro Anual da Ciência de Solo. Évora. (resumo + apresentação de painel)
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho e F. Martins. 2000. Using a portable chlorophyll meter in potato crop. 3rd Internacional Crop Science Congress. Hamburgo. (abstract, aceite para apresentação)

Resumo

A recomendação da fertilização azotada é, de entre a dos macronutrientes principais, a de qualidade mais duvidosa. Como consequência, é elevada a probabilidade de se aplicarem quantidades de azoto desadequadas às necessidades das culturas. É objectivo deste trabalho contribuir para a melhoria da qualidade da recomendação da fertilização azotada na batateira e para a implementação de práticas culturais que minimizem as saídas do nutriente para o meio ambiente. Para tal, procurou-se melhorar a recomendação da fertilização, transferindo parte da decisão para o momento da cobertura, tomando por base indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de N no solo.

Foi instalado um ensaio de campo com a cultura da batata durante três anos consecutivos, 1996-1998, com oito modalidades de fertilização azotada de fundo: 0 (N_f0), 50 (N_f50), 100 (N_f100), 200 (N_f200) e 300 (N_f300) kg N ha⁻¹ na forma de ureia e estrume de aviário (Eav), estrume de bovino (Ebo) e um resíduo sólido urbano (RSU), aplicados em doses equivalentes a 100 kg N ha⁻¹. Em cobertura foram usados 0, 25, 50, 100 e 200 kg N ha⁻¹ na forma de ureia. Durante a primeira metade do ciclo avaliou-se o estado nutritivo das plantas através dos indicadores N total nas folhas, nitratos nos pecíolos (determinados por um método laboratorial e com o reflectómetro portátil, RQflex) e estimativas do teor de clorofila obtidas com o aparelho SPAD-502. A disponibilidade de N no solo, no momento da cobertura, foi avaliada com base nos teores de azoto inorgânico nos 30 cm superficiais. Para obter informação sobre a disponibilidade de N do solo e dos correctivos orgânicos foram conduzidas incubações laboratoriais em condições aeróbias e anaeróbias e ensaiados os métodos de extracção química N total, CaCl₂ autoclave, KCl 2M a quente e tampão de fosfato/borato. Os testes incidiram sobre misturas solo/fertilizantes, de acordo com as modalidades de fundo N_f0 , N_f100 , Eav, Ebo e RSU. Uma técnica de incubação *in situ* forneceu informação sequencial sobre a mineralização líquida de azoto durante a estação de crescimento. O tritcale foi usado como cultura intercalar. Avaliou-se a sua capacidade na recuperação do N residual deixado pela cultura da batata e do N mineralizado durante o Inverno e início da Primavera. Os ensaios foram instalados sobre as modalidades de fertilização de fundo da cultura da batata. Constituíram-se modalidades com plantas e em solo nu. Determinou-se o N inorgânico no início (Outubro) e no fim (Abril) da experiência. No Inverno, foi avaliado o estado nutritivo das plantas e na colheita a biomassa produzida e o N exportado.

A produção de tubérculos de calibre comercial atingiu 54,7, 50,7 e 48,6 Mg ha⁻¹ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. A dose óptima de N aplicado em fundo variou de 225 a 300 kg ha⁻¹, dependendo do valor atribuído à batata. A dose óptima em cobertura dependeu da fertilização de fundo. Os resultados do RQflex estiveram altamente correlacionados com o teor de nitratos em soluções padrão de KNO₃ ($r^2 = 1,00$). A correlação dos resultados do RQflex e de um método laboratorial originou coeficientes de determinação entre 0,88 e 0,92. O SPAD-502 reproduziu leituras sobre o mesmo folíolo com coeficientes de variação (CV) entre 2,07 e 4,49 %. Leituras sobre folíolos de plantas diferentes originaram CV compreendidos entre 6,90 e 9,87 %. Estabeleceram-se níveis críticos para os indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de N no solo para todas as fases do ciclo. A % de estimativas erradas, associada aos níveis críticos, foi de 8,3 para N-NO₃⁻ e NO₃⁻ + NH₄⁺ no solo, 9,0 para N-NO₃⁻ nos pecíolos determinado pelo método laboratorial, 9,2 para o N total nas folhas, 10,2 para N-NO₃⁻ nos pecíolos determinado com o RQflex e 12,5 para o teor de clorofila SPAD. Foi possível quantificar a quantidade de N a aplicar em cobertura com base em qualquer um dos indicadores utilizados e para qualquer data de amostragem. O triticale foi pouco eficaz na recuperação do N inorgânico residual da cultura da batata, mas manteve os níveis de N-NO₃⁻ baixos na Primavera seguinte. O azoto exportado, na situação cultural mais favorável, atingiu os 80 kg ha⁻¹. Os resultados da incubação *in situ* estiveram bem correlacionados com o N exportado pelos tubérculos ($r^2 = 0,67$). Durante a estação de crescimento foram mineralizados 42 a 64, 60 a 76, 45 a 65 e 55 a 65 kg N ha⁻¹ nas modalidades N_f0, Eav, Ebo e RSU, respectivamente. As transformações mais importantes ocorreram nos 14 cm superficiais, representando, aqueles valores cerca de 85 a 88 % da estimativa do N total mineralizado. Foram estabelecidas correlações significativas entre os resultados da incubação aeróbia ($r^2 = 0,77$) e anaeróbia ($r^2 = 0,73$) com o N exportado pelos tubérculos. A solução KCl 2M a quente mostrou ser o método de extracção química com maiores potencialidades para avaliar a disponibilidade de azoto do solo e dos correctivos orgânicos. Os correctivos orgânicos exerceram um efeito reduzido na produção de tubérculos. Os cálculos do N recuperado, os indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de N no solo e os resultados das incubações *in situ* e laboratoriais forneceram indicação de que pouco N destes fertilizantes terá sido disponibilizado para as plantas durante a estação de crescimento e ao longo do Inverno e Primavera seguintes.

Abstract

Rodrigues, M. A. 2000. Nitrogen management in the potato crop: establishment of indices of the nitrogen status of plants and nitrogen availability in soils. UTAD, Vila Real, Portugal.

The recommendation of nitrogen fertilizer is still very uncertain compared to the other macronutrients. So, the probability is great that N will be used in doses not well fitted to crop needs. The objective of this work has been to contribute to the improvement of the accuracy of N recommendation and to the implementation of cultural practices that minimize nutrient losses to the environment. For this, it was proposed that part of the decision about N recommendation will be taken just before the time of sidedressing, supported by indices of N status of plants and N availability in soil.

Field experiments were made on the potato crop over three years, 1996-1998, with eight preplant fertilizer treatments: 0 (N_f0), 50 (N_f50), 100 (N_f100), 200 (N_f200) and 300 (N_f300) kg N ha⁻¹ as urea and cattle farmyard manure (Ebo), poultry manure (Eav) and an off-agriculture residue from municipal solid waste (RSU), both applied at a rate equivalent to 100 kg N ha⁻¹. Sidedress application rates were 0, 25, 50, 100 and 200 kg N ha⁻¹ as urea. In the first half of the growing season the nutritional status of the crop was appraised by leaf N content, petiole nitrate content of fresh (reflectometer, RQflex) and dry (laboratory method) tissue and chlorophyll readings (SPAD-502). The soil N availability at presidedresses was obtained determining the inorganic N to 30 cm. Laboratory aerobic and anaerobic short-term incubations and the chemical extractions methods total N, CaCl₂ autoclave, hot KCl 2 M and phosphate-borate buffer were performed to obtain the availability of N from soil and fresh organic sources. These experiments were made on soil/amendments mixtures, in conformity with N_f0 , N_f100 , Eav, Ebo and RSU treatments. A sequential *in situ* coring technique was used to provide information about net N mineralization during crop cycle. The triticale was used as winter N catch crop. Its efficiency was on residual inorganic N recovery from potato fertilization and its capacity to uptake the N mineralized during winter and early spring period. The trials were conducted on preplant fertilizer treatments after potato harvest. There were established pairs of bare and cultivated plots. Samples of soil were collected at the beginning (October) and at the end (April) of the experiments for determination the inorganic N. In the Winter the N

status of plants was appraised and the dry matter yield and the N recovery was determined at harvest.

Marketable tuber yield reached 54,7, 50,7 and 48,6 Mg ha⁻¹ in 1996, 1997 and 1998, respectively. Preplant optimum N fertilizer application ranged from 225 to 300 kg ha⁻¹, depending on the tuber price. Sidedress optimum N doses changed according to preplant applications. RQflex results were highly correlated ($r^2 = 1,00$) with nitrate content in prepared standard KNO₃ solutions. Correlations between RQflex results and a laboratory standard determination originated coefficients of determination ranged from 0,88 to 0,92. The reproductibility of SPAD reading on the same leaflet was expressed by coefficients of variation (CV) from 2,07 to 4,49 %. Readings on leaflets of the different plants given CV between 6,90 and 9,87 %. Critical levels were established for both indices of N status of plants and N availability in soils and for all growth stages. The error rate associated with critical levels was 8,3, 8,3, 9,0, 9,2, 10,2 and 12,5 % for soil N-NO₃⁻, N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺, petiole nitrate content (lab. method), total leaf N, petiole nitrate content (RQflex) and SPAD reading, respectively. It was possible to quantify the amount of sidedress N to apply, based on N status indices of plants and soil N availability. Triticale uptake efficiency of the residual inorganic N from potato crop was very poor, but the catch crop keep the soil inorganic N at low levels in the following Spring. Nitrogen off-taken reached 80 kg ha⁻¹ in the most favourable conditions. *In situ* incubation results were well correlated with N recovered by tubers ($r^2 = 0,67$). During potato crop cycle there were mineralized 42 to 64, 60 to 76, 45 to 65 and 55 to 65 kg N ha⁻¹ on treatments N_f0, Eav, Ebo and RSU, respectively. The shallow layer (to 14 cm) contributed with 85 to 88 % to the total N mineralized. Laboratory aerobic and anaerobic incubations results were significantly correlated ($r^2 = 0,77$ and $0,73$, respectively) with N uptake by tubers. Hot KCl 2 M was considered the best extraction method for assessment of the potentially available N from soils and fresh organic sources. The effect of amendments on tuber yield was weak. The estimatives of N uptake by tubers, the indices of N status of plants and availability in soil and laboratory incubations and chemical extractions results showed that little N was liberated to plants during the growing season nor during the following Winter and Spring.

Índice geral

Agradecimento	iii
Financiamento.....	iv
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de figuras.....	xv
Índice de quadros.....	xvi
Abreviaturas.....	xviii
1 – Introdução	1
1.1 – Justificação do tema	1
1.2 – Objectivos.....	2
1.3 – Organização da tese	3
2 – Revisão bibliográfica	5
2.1 – Dinâmica do azoto no sistema solo/planta	5
2.1.1 – Origem do azoto nos solos agrícolas	5
2.1.1.1 – Fixação biológica de azoto atmosférico	5
2.1.1.2 – Deposições atmosféricas.....	7
2.1.1.3 – Absorção de azoto pela canópia	9
2.1.1.4 – Entrada de azoto nos solos agrícolas por processos não naturais.....	10
2.1.2 – Disponibilidade das formas orgânicas	11
2.1.2.1 – Mineralização e imobilização biológica de azoto.....	12
2.1.2.2 – Factores que afectam o processo mineralização/imobilização	14
2.1.2.2.1 – Composição do substracto.....	14
2.1.2.2.2 – Temperatura	15
2.1.2.2.3 – Humidade	16
2.1.2.2.4 – Adição de fertilizantes.....	16
2.1.2.3 – Estabilidade do azoto imobilizado.....	17
2.1.3 – Disponibilidade das formas minerais de azoto	18
2.1.3.1 – Azoto nítrico e azoto amoniacal não especificamente ligado.....	18
2.1.3.2 – NH_4^+ fixado nos minerais de argila	19
2.1.3.3 – Fixação de NH_3 na matéria orgânica	21
2.1.3.4 – Transformações entre as formas minerais NO_3^- e NH_4^+	22
2.1.3.4.1 – Nitrificação.....	22
2.1.3.4.2 – Factores que afectam a nitrificação	23
2.1.3.4.3 – Redução dissimilatória	24
2.1.4 – Saídas de azoto do sistema solo/planta	24
2.1.4.1 – Desnitrificação biológica	25
2.1.4.2 – Desnitrificação não enzimática.....	27
2.1.4.3 – Volatilização de amoníaco.....	28
2.1.4.4 – Lixiviação	30
2.1.4.5 – Erosão	32
2.1.4.6 – Perdas pela canópia	32
2.1.4.7 – Perdas de azoto durante a nitrificação	34
2.1.4.8 – Azoto exportado pelas plantas.....	34
2.1.5 – Eficiência da fertilização azotada	34
2.1.5.1 – Efeito das técnicas culturais na percentagem de azoto recuperado	36

2.1.5.2 – Eficiência fisiológica.....	38
2.1.5.3 – Eficiência dos sistemas culturais.....	38
2.2 - Avaliação da disponibilidade de azoto no solo.....	40
2.2.1 - Ensaios biológicos.....	41
2.2.2 - Azoto inorgânico no solo	42
2.2.2.1 – Avaliação do azoto inorgânico no início da estação de crescimento	42
2.2.2.2 – Avaliação do azoto inorgânico durante a estação de crescimento	44
2.2.3 – Índices laboratoriais de disponibilidade de azoto.....	45
2.2.3.1 – Incubações biológicas	45
2.2.3.1.1 - Incubações aeróbias.....	46
2.2.3.1.1.1 – Incubações aeróbias de curta duração	47
2.2.3.1.1.2 - Incubações aeróbias de longa duração	48
2.2.3.1.2 – Incubações anaeróbias	59
2.2.3.2 – Extracções químicas.....	51
2.2.3.2.1 – Determinação do azoto total	52
2.2.3.2.2 – Método do autoclave.....	53
2.2.3.2.3 – Soluções salinas de cloreto de potássio	54
2.2.3.2.4 – Solução tampão de fosfato/borato	56
2.2.3.2.5 – Outros métodos de extracção.....	56
2.2.3.3 – Métodos que utilizam membranas de troca iónica.....	58
2.2.3.4 – Avaliação da disponibilidade do azoto dos correctivos orgânicos	60
2.2.4 – Técnicas de incubação <i>in situ</i>	62
2.2.5 – Sistemas de recomendação de fertilização	64
2.2.5.1 – Azoto inorgânico no perfil	65
2.2.5.2 – Sistemas que incluem índices de disponibilidade de azoto no solo	66
2.2.5.3 – Método dos balanços.....	68
2.2.5.4 – Método indirecto	68
2.2.5.5 – Métodos de optimização dinâmica.....	69
2.2.5.6 – Recomendação da fertilização azotada em Portugal.....	70
2.3 - Diagnóstico do estado nutritivo das plantas	71
2.3.1 - Conceitos e terminologias.....	71
2.3.2 - Utilidade e limitações.....	71
2.3.3 - Disponibilidade de nutrientes, crescimento e composição mineral das plantas	73
2.3.4 - Factores que afectam a composição mineral das plantas.....	74
2.3.4.1 - Estado fenológico das plantas e idade dos tecidos	75
2.3.4.2 - Escolha do tecido e sua posição na planta	77
2.3.4.3 - Interacção entre nutrientes	80
2.3.4.4 - Factores genéticos.....	81
2.3.4.5 - Pragas, doenças e tratamentos fitossanitários.....	82
2.3.4.6 - Factores ambientais	83
2.3.4.7 - Efeitos sazonais e regionais	85
2.3.5 - Indicadores do estado nutritivo	86
2.3.6 - Interpretação dos resultados.....	88
2.3.6.1 - Concentração crítica	88
2.3.6.2 - Classes de suficiência	91
2.3.6.3 - Sistema integrado de diagnóstico e recomendação	93
2.3.6.4 - Outras propostas de interpretação de resultados.....	96
2.3.7 - Recomendação da fertilização	97
2.3.7.1 - Testes rápidos de tecidos	97

2.3.7.1.1 - Avaliação do teor de nitratos	98
2.3.7.1.2 - Avaliação do teor de clorofila.....	101
2.4 – Fertilização azotada da batateira.....	104
2.4.1 – Absorção e assimilação de azoto	104
2.4.2 – Efeito do azoto no desenvolvimento das plantas e na produção de tubérculos	106
2.4.2.1 – Radiação interceptada e eficiência fotossintética	106
2.4.2.2 – Tuberização e desenvolvimento inicial dos tubérculos	108
2.4.2.3 – Produção de tubérculos.....	109
2.4.2.4 – Curvas de resposta à fertilização azotada	110
2.4.2.5 – Considerações económicas	111
2.4.3 – Efeito do azoto na qualidade dos tubérculos.....	112
2.4.4 – Efeito das técnicas de aplicação e das formas de azoto	114
2.4.4.1 – Aplicações fraccionadas de azoto.....	114
2.4.4.2 – Localização do fertilizante.....	115
2.4.4.3 – Formas de azoto.....	116
2.4.5 – Correctivos orgânicos	117
3 – Material e métodos.....	119
3.1 – Ensaios de campo com a cultura da batata.....	119
3.1.1 – Localização	119
3.1.2 – Solo	119
3.1.3 – Clima.....	119
3.1.4 – Delineamento experimental	122
3.1.5 – Técnica cultural.....	124
3.1.5.1 – Inserção dos ensaios na rotação.....	124
3.1.5.2 – Preparação do solo.....	125
3.1.5.3 – Fertilização	125
3.1.5.4 – Material vegetal	126
3.1.5.5 – Plantação.....	127
3.1.5.6 – Tratamentos fitossanitários.....	127
3.1.5.7 – Rega.....	128
3.1.5.7.1 – Cálculo da dotação de rega.....	128
3.1.5.7.2 – Cálculo do intervalo de tempo entre regas	129
3.1.5.7.3 – Uniformidade da rega.....	130
3.1.5.7.4 – Quantidade e qualidade da água.....	131
3.1.5.8 – Colheita.....	132
3.1.6 – Determinações de campo e laboratoriais	132
3.1.6.1 – Observações fenológicos	132
3.1.6.2 – Indicadores do estado nutritivo.....	133
3.1.6.2.1 – Colheita de folhas.....	134
3.1.6.2.1.1 – Determinação de percentagem de azoto total nas folhas	135
3.1.6.2.1.2 – Determinação expedita do teor de nitratos nos pecíolos.....	135
3.1.6.2.1.3 – Determinação laboratorial do teor de nitratos nos pecíolos.....	136
3.1.6.2.2 – Determinação das estimativas do teor de clorofila.....	137
3.1.6.3 – Teste ao azoto inorgânico do solo em pré-cobertura.....	139
3.1.6.4 – Avaliação da produção e da qualidade dos tubérculos	140
3.2 – Ensaios de campo com a cultura intercalar	141
3.2.1 – Delineamento experimental	141
3.2.2 – Técnica cultural.....	142

3.2.3 – Determinações	142
3.2.3.1 – Azoto inorgânico residual em Outubro	142
3.2.3.2 – Estado nutritivo das plantas durante o ciclo	143
3.2.3.3 – Corte da cultura intercalar	143
3.2.3.4 – Azoto inorgânico residual em Abril	144
3.3 – Métodos de incubação e extracção química	144
3.3.1 – Incubação <i>in situ</i>	144
3.3.2 – Métodos laboratoriais	145
3.3.2.1 – Preparação das misturas solo/fertilizante	146
3.3.2.2 – Incubações biológicas aeróbias	146
3.3.2.2.1 – Incubação aeróbia com areia	146
3.3.2.2.2 – Incubação aeróbia com membranas de troca aniónica	147
3.3.2.3 – Incubação biológica anaeróbia	147
3.3.2.4 – Extracções químicas	148
3.3.2.4.1 – Método do autoclave	148
3.3.2.4.2 – Solução salina de cloreto de potássio	148
3.3.2.4.3 – Solução tampão de fosfato/borato	149
3.3.2.4.4 – Azoto total	149
3.3.2.5 – Miscelânea	149
3.4 – Tratamento estatístico dos resultados	150
4 – Resultados e discussão	151
4.1 – Efeito do azoto na produção de tubérculos	151
4.1.1 – Selecção da curva de resposta à fertilização azotada	151
4.1.2 – Resposta ao azoto aplicado em fundo	153
4.1.3 – Resposta aos fertilizantes orgânicos	156
4.1.4 – Resposta ao azoto aplicado em cobertura	157
4.2 – Efeito do azoto na qualidade dos tubérculos	160
4.2.1 – Calibre, matéria seca e nitratos nos tubérculos	160
4.2.2 – Cor após fritura	163
4.2.3 – Defeitos externos	163
4.2.3.1 – Abrolhamento, recrescimento e esverdeamento	163
4.2.3.2 – Pragas	164
4.2.3.3 – Sarna vulgar	164
4.2.3 – Relação entre gravidade específica e matéria seca	165
4.3 – Eficiência de utilização do azoto	166
4.3.1 – Teor de azoto total nos tubérculos	166
4.3.2 – Azoto exportado pelos tubérculos	168
4.3.3 – Percentagem de azoto dos fertilizantes recuperado pelos tubérculos	169
4.4 – Indicadores do estado nutritivo e da disponibilidade de azoto no solo	171
4.4.1 – Estados fenológicos e cronologia do desenvolvimento das plantas	171
4.4.1.1 – Data de emergência	172
4.4.1.2 – Desenvolvimento fenológico das plantas	173
4.4.2 – Efeito do azoto nos indicadores do estado nutritivo e da disponibilidade de azoto no azoto	175
4.4.2.1 – Nitratos nos pecíolos	175
4.4.2.2 – Azoto total nas folhas	178
4.4.2.3 – Estimativas do teor de clorofila	180
4.4.2.4 – Azoto inorgânico no solo durante a estação de crescimento	181
4.4.3 – Relação entre indicadores	183

4.4.3.1 – Determinação da concentração de nitratos nos pecíolos pelo método laboratorial e pelo reflectómetro portátil	183
4.4.3.2 – Relação entre azoto total nas folhas e nitratos nos pecíolos.....	184
4.4.3.3 – Relação entre nitratos nos pecíolos e valores de clorofila SPAD.....	185
4.4.3.4 – Relação entre azoto total nas folhas e valores de clorofila SPAD.....	185
4.4.4 – Determinação de níveis críticos dos indicadores do estado nutritivo e da disponibilidade de azoto no solo	186
4.4.4.1 – Nitratos nos pecíolos (método laboratorial)	187
4.4.4.2 – Nitratos nos pecíolos (método expedito)	189
4.4.4.3 – Azoto total nas folhas	190
4.4.4.4 – Valores de clorofila SPAD	191
4.4.4.5 – Azoto mineral no solo durante a estação de crescimento	193
4.4.5 – Variação temporal dos níveis críticos	195
4.4.6 – Quantificação do azoto a aplicar em cobertura.....	198
4.4.7 – Efeito da adubação de cobertura na concentração de nitratos nos pecíolos	205
4.4.8 – Efeito da adubação de cobertura na concentração de azoto total nas folhas.....	207
4.5 – Recuperação de azoto residual pela cultura intercalar	208
4.5.1 – Azoto inorgânico residual no solo no início do Outono	208
4.5.2 – Avaliação do estado nutritivo das plantas durante o Inverno	210
4.5.3 – Biomassa produzida e azoto exportado.....	211
4.5.4 – Azoto inorgânico residual no solo na Primavera	213
4.6 – Avaliação da disponibilidade de azoto no solo.....	216
4.6.1 – Azoto exportado e produção de tubérculos.....	216
4.6.2 – Incubação <i>in situ</i>	217
4.6.2.1 – Azoto mineral no solo.....	217
4.6.2.2 – Taxas de amonificação e nitrificação	220
4.6.2.3 – Acumulação líquida de azoto mineral	223
4.6.2.4 – Relação entre o azoto acumulado na incubação <i>in situ</i> e exportado pelos tubérculos	226
4.6.2.5 – Balanço de azoto no solo	226
4.6.3 – Incubações laboratoriais.....	228
4.6.3.1 – Incubação biológica aeróbia	228
4.6.3.2 – Incubação biológica anaeróbia	229
4.6.3.3 – Incubação aeróbia vs incubação anaeróbia.....	230
4.6.3.4 – Incubação aeróbia com membranas de troca.....	231
4.6.4 – Métodos de extracção química.....	233
4.6.4.1 – Azoto total	233
4.6.4.2 – Método do autoclave	233
4.6.4.3 – Tampão de fosfato/borato	234
4.6.4.4 – Solução salina de cloreto de potássio	235
5 – Conclusões	237
5.1 – Produção e qualidade dos tubérculos	237
5.2 – Eficiência de uso do azoto.....	237
5.3 – Calibração dos aparelhos portáteis RQflex e SPAD-502.....	238
5.4 – Indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de azoto no solo	238
5.5 – Níveis críticos e quantificação do azoto a aplicar em cobertura	239

5.6 – Cultura intercalar	240
5.7 – Incubação <i>in situ</i>	241
5.8 – Incubações laboratoriais	241
5.9 – Métodos de extracção química	242
5.10 – Utilização dos correctivos orgânicos	242
6 – Bibliografia	245
7 – Anexos	279
7.1 - Caracterização do perfil.....	279
7.2 – Recomendação de fertilização	281
7.3 – Determinações preliminares nas terras destinadas a testes laboratoriais.....	281
7.4 – Caracterização fisiológica dos tubérculos/semente	282
7.5 – Caracterização dos correctivos orgânicos.....	282
7.6 – Tratamentos fitossanitários	283
7.7 – Rega	284
7.8 – Registos das observações fenológicas	285
7.9 – Registos das determinações na colheita.....	289
7.10 – Registos dos indicadores do estado nutritivo	301
7.11 – Registos sobre a cultura intercalar.....	310
7.12 – Registos do azoto inorgânico no perfil	313
7.13 – Registos sobre a incubação <i>in situ</i>	316
7.14 – Registos sobre as incubações laboratoriais e as extracções químicas	319
7.15 – Resultados de análises de variância.....	320
7.15.1 – Produção de tubérculos	320
7.15.2 – Percentagem de azoto total nos tubérculos.....	320
7.15.3 – Azoto exportado pelos tubérculos	321
7.15.4 – Taxa de cobertura	321
7.15.5 – Altura das plantas	321
7.15.6 – Nitratos nos pecíolos (determinação laboratorial).....	322
7.15.7 – Azoto total nas folhas	322
7.15.8 – Clorofila SPAD	322
7.15.9 – Nitratos no solo durante a estação de crescimento.....	322
7.15.10 – Azoto inorgânico no solo durante a estação de crescimento.....	322
7.15.11 – Azoto inorgânico residual no Outono	323
7.15.12 – Análise de plantas na cultura intercalar.....	323
7.15.13 – Azoto inorgânico no solo em Abril (solo nu).....	323
7.15.14 – Azoto inorgânico no solo em Abril (sob a cultura intercalar).....	323
7.15.15 – Azoto inorgânico no solo em Abril (solo nu vs intercalar)	323
7.15.16 – Incubação <i>in situ</i> . N-NH ₄ ⁺ no solo	324
7.15.17 - Incubação <i>in situ</i> . N-NO ₃ ⁻ no solo	324
7.15.18 - Incubação <i>in situ</i> . Taxa de amonificação	325
7.15.19 - Incubação <i>in situ</i> . Taxa de nitrificação	325
7.15.20 - Incubação <i>in situ</i> . N-NH ₄ ⁺ acumulado	326
7.15.21 - Incubação <i>in situ</i> . N-NO ₃ ⁻ acumulado.....	326
7.16 – Elementos matemáticos para a implementação do modelo exponencial modificado	327
7.16.1 – Determinação da constante <i>a</i>	327
7.16.2- Equações de ajustamento para a relação entre o azoto aplicado e a produção de tubérculos.....	327

Índice de figuras

Figura 1 – Relação entre a concentração dos nutrientes nos tecidos e o crescimento/produção	73
Figura 2 – Concentração crítica de nutrientes nos tecidos	89
Figura 3 – Nível crítico definido pelo método gráfico	90
Figura 4 – Valores semanais da temperatura do ar	121
Figura 5 – Valores semanais da precipitação acumulada.....	121
Figura 6 – Organização dos ensaios de campo.....	124
Figura 7 – Relação entre a concentração de nitratos em soluções padrão de nitrato de potássio e as leituras com o RQflex	136
Figura 8 – Variação nos valores SPAD obtidos com leituras sobre o mesmo folíolo	138
Figura 9 – Variação nos valores SPAD obtidos com leituras sobre folíolos de plantas diferentes.....	138
Figura 10 – Produção comercial de tubérculos em função do azoto total aplicado	152
Figura 11 – Posição dos resíduos resultantes do ajustamento pela exponencial modificada.....	153
Figura 12 – Resposta ao azoto aplicado em fundo.....	153
Figura 13 – Resultados dos fertilizantes orgânicos relativamente à ureia	156
Figura 14 – Resposta ao azoto aplicado em cobertura para as diferentes modalidades de fertilização	158
Figura 15 – Percentagem de tubérculos afectados com sarna por graus de incidência.....	165
Figura 16 – Relação entre a gravidade específica e a percentagem de matéria seca nos tubérculos.....	166
Figura 17 – Variação no teor de azoto nos tubérculos em função das modalidades de fertilização de fundo e do azoto aplicado em cobertura	167
Figura 18 – Variação no azoto exportado pelos tubérculos das modalidades de fertilização de fundo e do azoto aplicado em cobertura.....	168
Figura 19 – % de azoto recuperado nas modalidades de fertilização de fundo.....	169
Figura 20 – % de azoto recuperado relativamente ao azoto total aplicado	171
Figura 21 – Evolução da emergência das jovens plantas	172
Figura 22 – Taxa de cobertura, altura das plantas e vegetação	173
Figura 23 – Evolução do teor de nitratos nos pecíolos em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem	176
Figura 24 – Variação do azoto total nas folhas em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem	179
Figura 25 – Evolução dos valores SPAD em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem	180
Figura 26 – Evolução dos níveis de azoto mineral no solo em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem	182
Figura 27 – Relação entre a concentração de nitratos nos pecíolos determinada pelos métodos expedito e laboratorial.....	183
Figura 28 – Relação entre o azoto total nas folhas e a concentração de nitratos nos pecíolos.....	184
Figura 29 – Relação entre os valores SPAD e o teor de nitratos nos pecíolos.....	185

Figura 30 – Relação entre o azoto total nas folhas e os valores SPAD	186
Figura 31 – Determinação dos níveis críticos pelo método analítico	187
Figura 32 – Determinação dos níveis críticos pelo método gráfico	187
Figura 33 – Variação temporal dos níveis críticos	195
Figura 34 – Relação entre a concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e a dose óptima de azoto em cobertura	199
Figura 35 – Variação na concentração de nitratos nos pecíolos em função do azoto aplicado em fundo e em cobertura	206
Figura 36 – Variação na concentração de azoto total nas folhas em função do azoto aplicado em fundo e em cobertura	208
Figura 37 – Azoto mineral residual no solo após a colheita da cultura da batata.....	209
Figura 38 – Valores de $N-NO_3^-$ residual em Abril na situação de solo nu e com tritcale	214
Figura 39 – Relação entre o azoto exportado e a produção de tubérculos.....	216
Figura 40 – Evolução dos níveis de $N-NH_4^+$ no solo durante a estação de crescimento....	217
Figura 41 – Evolução dos níveis de NO_3^- no solo durante a estação de crescimento.....	219
Figura 42 – Taxas de amonificação durante a estação de crescimento	221
Figura 43 – Taxas de nitrificação durante a estação de crescimento	222
Figura 44 – Acumulação de $N-NH_4^+$ durante a estação de crescimento.....	223
Figura 45 – Acumulação de $N-NO_3^-$ durante a estação de crescimento	225
Figura 46 – Relação entre o azoto mineral acumulado durante a estação de crescimento e o azoto exportado.....	226
Figura 47 – Relação entre o azoto mineralizado na incubação aeróbia e exportado pela cultura	228
Figura 48 – Relação entre os resultados da incubação anaeróbia (destilação do extracto) com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação <i>in situ</i>	229
Figura 49 – Relação entre os resultados da incubação anaeróbia (destilação do extracto) e incubação aeróbia (sem exclusão do azoto mineral inicial)	230
Figura 50 – Relação entre a quantidade de ião nitrato adsorvido nas membranas com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação <i>in situ</i>	232
Figura 51 – Relação entre os resultados das incubações (a) aeróbia com areia e (b) anaeróbia e da incubação com membranas.....	232
Figura 52 – Relação entre o azoto total com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação <i>in situ</i>	233
Figura 53 – Relação entre o resultado do método do autoclave com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação <i>in situ</i>	234
Figura 54 – Relação entre o azoto libertado pelo TFB com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação <i>in situ</i>	235
Figura 55 – Relação entre o azoto hidrolisado pelo KCl a quente com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação <i>in situ</i>	236

Índice de quadros

Quadro 1 – Intervalo de tempo entre regas.....	130
Quadro 2 – Quantidade de água e azoto introduzidos nos ensaios pela	

rega e pela precipitação	132
Quadro 3 – Calendarização das determinações do estado nutritivo das planta.....	134
Quadro 4 – Soma dos quadrados dos resíduos após ajustamento do modelo exponencial modificado e do modelo quadrático.....	152
Quadro 5 – Pontos característicos das curvas de ajustamento	154
Quadro 6 – Dose de azoto óptima em cobertura e produção correspondente em função da fertilização de fundo	159
Quadro 7 – Efeito da fertilização de fundo na percentagem de tubérculos grandes, na percentagem de matéria seca e na concentração de nitratos nos tubérculos.....	160
Quadro 8 – Efeito da fertilização de cobertura (sobre N_f0) na percentagem de tubérculos grandes, na percentagem de matéria seca e na concentração de nitratos nos tubérculos	161
Quadro 9 – Efeito do azoto total (fundo + cobertura) na percentagem de tubérculos grandes, na % de matéria seca e na concentração de nitratos nos tubérculos	161
Quadro 10 – Percentagem de azoto recuperado nas modalidades de cobertura em função das modalidades de fundo	170
Quadro 11 – Evolução da floração	174
Quadro 12 – Correspondência entre escalas cronológicas e fenológicas para as datas de avaliação do estado nutritivo das plantas	175
Quadro 13 – Níveis críticos para a concentração de nitratos nos pecíolos ($g\ N-NO_3^-\ kg^{-1}$) determinada pelo método laboratorial.....	188
Quadro 14 – Níveis críticos para a concentração de nitratos nos pecíolos ($g\ NO_3^-\ L^{-1}$) determinada pelo método expedito	190
Quadro 15 – Níveis críticos para a concentração de azoto total nas folhas ($g\ kg^{-1}$)	190
Quadro 16 - Níveis críticos para a clorofila SPAD (unidades SPAD).....	191
Quadro 17 – Níveis críticos para os valores SPAD relativos (%).....	193
Quadro 18 – Níveis críticos para o teor de nitratos no solo ($mg\ N-NO_3^-\ kg^{-1}$) durante a estação de crescimento	193
Quadro 19 – Níveis críticos para o azoto mineral ($mg\ N\ inorgânico\ kg^{-1}$) no solo durante a estação de crescimento	194
Quadro 20 – Variação dos níveis críticos ao longo da estação de crescimento	196
Quadro 21 – Relação entre o teor de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e a dose óptima em cobertura para todas as datas de amostragem dos três anos de ensaio.....	200
Quadro 22 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) nas datas de amostragem reais em função da concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) definida a intervalos regulares	200
Quadro 23 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) com base na concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e na data de amostragem	201
Quadro 24 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) com base na concentração de nitratos nos pecíolos (método expedito) e na data de amostragem	202
Quadro 25 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) com base no azoto nas folhas e na data de amostragem	203
Quadro 26 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) com base nos valores SPAD e na data de amostragem	203
Quadro 27 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) com base nos valores SPAD relativo e na data de amostragem	204
Quadro 28 – Adubação de cobertura ($kg\ N\ ha^{-1}$) com base no teor de nitratos no solo e na data de amostragem.....	204

Quadro 29 – Adubação de cobertura (kg N ha ⁻¹) com base no azoto inorgânico no solo e na data de amostragem	205
Quadro 30 – Nitratos e azoto total nas plantas no fim do Inverno	211
Quadro 31 – Biomassa, concentração de azoto nas plantas e azoto exportado pelo triticales	212

Abreviaturas

- ANI – added nitrogen interaction
- DAE – dias após emergência
- DAP – dias após plantação
- DRIS – the diagnosis and recommendation integrated system
- Eav, Ebo e RSU – modalidades de fertilização de fundo com os correctivos orgânicos estrume de aviário, estrume de bovino e resíduo sólido urbano, respectivamente, aplicados em dose equivalente a 100 kg N ha⁻¹.
- e_{tuber} – eficiência de conversão da radiação em tubérculos
- EUN – eficiência de uso do azoto
- N_c0, N_c25, N_c50, N_c100 e N_c200 – modalidades de fertilização de cobertura com 0, 25, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de azoto na forma de ureia, respectivamente.
- N_f0, N_f50, N_f100, N_f200 e N_f300 – modalidades de fertilização de fundo com 0, 50, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, respectivamente.
- p. ex. – por exemplo
- PSNT – pre-sidedress nitrate test
- TFB – tampão de fosfato/borato

1 – Introdução

1.1 - Justificação do tema

O azoto é um elemento essencial a todos os organismos vivos. As plantas utilizam-no na síntese de moléculas importantes como os aminoácidos e os ácidos nucleicos que, por sua vez, são precursores de estruturas vitais como a clorofila, as enzimas e as nucleoproteínas (Tisdale *et al.* 1985). Como os solos agrícolas, normalmente, não dispõem de azoto em formas utilizáveis pelas plantas em quantidade suficiente, a produtividade das culturas é assegurada pela adição de fertilizantes.

As plantas recuperam apenas parte do azoto que é aplicado como fertilizante. Em valor médio, a percentagem de azoto recuperado não ultrapassa os 40 a 60 % (Boswell *et al.*, 1985). Quando se utilizam fertilizantes orgânicos, a eficiência é ainda menor (Rodrigues e Coutinho, 1996). A baixa percentagem de azoto recuperado deve-se ao grande número de mecanismos através dos quais o nutriente se pode tornar inacessível para as plantas. Entre eles destacam-se a imobilização biológica de azoto, a lixiviação e desnitrificação de nitratos e a volatilização de amoníaco.

A utilização de doses elevadas de azoto é um dos factores que mais contribui para a reduzida eficiência de utilização do nutriente. Contudo, é conhecida a tendência generalizada, nas regiões agrícolas mais desenvolvidas, para se usar azoto em excesso. Algumas das razões que o justificam são: (i) resposta evidente das plantas ao azoto aplicado, quer no desenvolvimento vegetativo, quer na produção (deve-se ao facto dos solos raramente disporem de azoto em quantidades suficientes); (ii) a possibilidade do azoto aplicado poder originar a formação de um extenso patamar, para o qual a produção embora não aumente também não revela um decréscimo evidente quando se ultrapassa a dose técnica óptima (MacKerron *et al.* 1993); (iii) preço da unidade de azoto normalmente baixo quando comparado com o valor das produções (Harris, 1992); (iv) grande incerteza na qualidade da recomendação da fertilização azotada (apesar do esforço dos investigadores nas últimas décadas não foi ainda desenvolvido nenhum teste laboratorial de resultados satisfatórios) (Dahnke e Johnson, 1990); e (v) tendência dos agricultores para sobrestimarem a produção esperada (Rice e Havlin, 1994).

Quando se utiliza azoto em excesso, a qualidade dos produtos agrícolas pode diminuir e, nalguns casos, tornarem-se prejudiciais à saúde. Por outro lado, o azoto que não é recuperado pelas plantas pode sair do sistema, contaminando as águas e a atmosfera. A ingestão excessiva de nitratos na água e nos alimentos está associada a uma doença infantil, a metemoglobinémia, e ao cancro gástrico. No meio ambiente o azoto pode contribuir para a eutrofização de águas superficiais, depleção da camada de ozono, efeito de estufa e chuvas ácidas.

A fertilização azotada, devido aos seus efeitos potencialmente negativos na saúde humana e no meio ambiente, tem envolvido o esforço de muitos investigadores nos últimos anos. A nível institucional, tem surgido legislação (p. ex. Decreto-lei nº 235/97, que transpõe as disposições comunitárias contidas na directiva nº 91/676/CEE) a qual sugere normas de conduta (p. ex. artigo nº 6 do decreto referido, relativo ao código de boas práticas agrícolas) e sanciona (artigo nº 10 do mesmo decreto) os excessos, visando racionalizar o uso dos fertilizantes azotados. Por outro lado, a maior sensibilização das populações para os problemas ambientais tem aberto caminho a correntes filosóficas que apresentam sistemas de agricultura alternativos que aludem a um objectivo único de preservação de recursos e onde os fertilizantes de síntese não são utilizados (Coelho e Pinto, 1994). Assim, e atendendo ao panorama actual, é de esperar que a legislação caminhe para medidas cada mais restritivas. Contudo, a necessidade de se manter a produtividade das culturas em níveis elevados, até para diminuir a pressão sobre regiões agrícolas marginais, levará, certamente, a que os fertilizantes continuem a ser utilizados durante longos anos. Sendo assim, é importante que a sua utilização seja feita de forma racional, com base em critérios de natureza científica.

1.2 - Objectivos

Esta tese, com metodologias definidas em campos diversos da fertilização azotada, tem como objectivo gerar informação que auxilie na definição de estratégias que permitam melhorar a eficiência de uso do azoto e, conseqüentemente, serem minimizados os efeitos negativos no meio ambiente.

O problema é equacionado sobre três linhas metodológicas de base que definem igual número de objectivos mais específicos:

(i) contribuir para melhorar a qualidade da recomendação da fertilização azotada com base em análises de terras. Procura-se obter informação sobre a disponibilidade de azoto no solo e em correctivos orgânicos, ao longo da estação de crescimento, recorrendo a técnicas de incubação de campo e laboratoriais e a métodos de extracção química;

(ii) ensaiar a possibilidade de se transferir a decisão ou parte da decisão da recomendação de fertilização para o momento da cobertura, tomando por base indicadores seleccionados do estado nutritivo das plantas em crescimento e da disponibilidade de azoto no solo na data de cobertura. A informação necessária é obtida em ensaios de campo com a cultura da batata, sujeita a várias modalidades de fertilização azotada de fundo e em cobertura. São também utilizados correctivos orgânicos. Este é o tema central da tese e aquele que envolve maior esforço de investigação, a avaliar pelo número de determinações efectuadas; e

(iii) introduzir técnicas culturais susceptíveis de diminuir a perda de azoto durante o Inverno. Avalia-se a eficácia da introdução de uma cultura intercalar, o triticales, na recuperação do azoto inorgânico residual resultante da fertilização da cultura da batata. O delineamento do ensaio de campo, que decorre durante o Inverno, inclui modalidades com plantas e na situação de solo nu.

1.3 - Organização da tese

Esta tese é composta por seis capítulos, organizados pela sequência: revisão bibliográfica, material e métodos, resultados e discussão, conclusões, bibliografia e anexos.

A revisão bibliográfica está dividida em quatro subcapítulos. No primeiro, com o título “Dinâmica do azoto no sistema solo/planta”, revê-se o ciclo do nutriente nos solos agrícolas e a sua relação com o ciclo global. São também tidas em conta as alterações provocadas pelo homem, através das fertilizações, no balanço de entradas e saídas do nutriente. No segundo subcapítulo apresentam-se os resultados da investigação dos últimos anos sobre métodos de avaliar a disponibilidade natural de azoto no solo. Destacam-se as incubações biológicas e as extracções químicas como métodos laboratoriais e as incubações *in situ* como métodos de campo. No subcapítulo 3 é revista a informação disponível sobre avaliação do estado nutritivo das plantas e a sua integração nos sistemas de recomendação de fertilização. No subcapítulo 4 revê-se o efeito da fertilização azotada no desenvolvimento e produção da cultura da batata e

na qualidade dos tubérculos. Os subcapítulos 1 e 4 foram relativamente menos desenvolvidos, na medida em que tratam assuntos apenas indirectamente relacionados com a tese. Por outro lado, têm sido revistos com frequência na língua portuguesa, designadamente o ciclo do azoto por Martins (1994), Rodrigues (1995) e Trindade (1997), e a fertilização azotada da batateira por Coelho (1992), Almeida (1995) e Rodrigues (1995). Os assuntos dos subcapítulos 2 e 3 foram mais aprofundados, na medida em que estão directamente relacionados com o trabalho experimental.

O capítulo Material e Métodos contém a descrição das experiências de campo e laboratoriais, as condições em que ocorreram, os materiais utilizados e as técnicas estatísticas usadas no tratamento de dados. Por vezes, metodologias particulares, nomeadamente ligadas à interpretação dos resultados, foram desenvolvidas no capítulo resultados e discussão. Este critério foi apenas utilizado quando nos pareceu que haveria vantagens evidentes para o leitor.

A apresentação dos resultados e a sua discussão não seguem a ordem temática da revisão bibliográfica. O capítulo inicia-se pelos resultados da produção e da qualidade dos tubérculos, seguidos dos indicadores do estado nutritivo das plantas. Os estudos com a cultura de Inverno vêm depois, surgindo, por fim, os resultados das incubações de campo e laboratoriais e das extracções químicas.

Num pequeno capítulo, separado dos resultados e discussão, é apresentado um resumo com as principais conclusões do trabalho.

A bibliografia contém a lista de referências citadas nos textos.

Nos anexos foram incluídos os resultados de campo e laboratoriais e toda a informação considerada de menor importância para a compreensão dos textos. Nos anexos constam também os resumos das análises estatísticas efectuadas.

2 – Revisão bibliográfica

2.1 – Dinâmica do azoto no sistema solo/planta

O ciclo do azoto no solo é uma parte integrante do ciclo biogeoquímico ou global do nutriente na natureza. O ciclo global compreende um conjunto de sequências e mudanças de forma dos átomos de azoto considerando um ponto de partida e um ponto de chegada, que engloba a litosfera, a atmosfera e a hidrosfera (Stevenson, 1986). As interações entre o ciclo do azoto no solo e o ciclo global são normalmente apresentadas na forma de balanço entre os ganhos e as perdas pelo sistema solo/planta. Incluem processos como a fixação biológica de azoto elementar (N_2), deposições atmosféricas, lixiviação, volatilização e erosão (Hart *et al.*, 1994). No solo, o processo mineralização/imobilização, que permite a reversão entre as formas orgânicas e minerais de azoto, é considerado o de maior importância (Stevenson, 1986). Este ciclo interno exerce um efeito decisivo na presença de azoto no solo em combinações químicas utilizáveis pelas plantas.

A quantificação dos processos que integram o ciclo do azoto nos solos agrícolas é determinante para se desenvolverem estratégias que minimizem as saídas de azoto do sistema. Contudo, segundo Powlson (1993) é ainda difícil fazer medições realistas dos principais processos em condições de campo.

2.1.1 – Origem do azoto nos solos agrícolas

O azoto entra no sistema solo/planta por processos naturais através da fixação biológica de N_2 , deposições atmosféricas e por absorção directa pela canópis. As entradas especificamente ligadas à actividade agrícola resultam da adição de fertilizantes minerais e orgânicos, pela água de rega e através das sementes.

2.1.1.1– Fixação biológica de azoto atmosférico

A forma molecular, N_2 , pode ser considerada a origem e o destino no ciclo biogeoquímico do azoto. A molécula N_2 é o gás predominante na atmosfera, ocupando cerca de 79 % em volume, relativamente a todos os gases (Barber, 1995; Foth e Ellis, 1997). Os

seus átomos estão unidos por uma ligação covalente tripla, muito estável, comportando-se como um gás praticamente inerte, pelo que não pode ser usado directamente pelas plantas superiores nem pelos animais. Apesar da extrema estabilidade da molécula, a fixação industrial é possível. O principal processo de fixação industrial, designado de *Haber-Bosch*, foi desenvolvido na Alemanha em 1910. Consiste na síntese de amoníaco (NH_3) através da reacção de N_2 e hidrogénio molecular (H_2) na presença de catalisadores e sob temperatura e pressão muito elevadas (Tisdale *et al.*, 1985). Na natureza, um número limitado de microrganismos procariotas consegue utilizar directamente o azoto atmosférico à temperatura e pressão ambiente. Os organismos com capacidade de fixação têm em comum a informação genética para sintetizar a enzima nitrogenase, que catalisa a redução de N_2 a NH_3 (Havelka *et al.*, 1982; Mengel e Kirkby, 1987). A fixação biológica de azoto elementar é considerado um dos processos bioquímicos mais importantes para a vida na terra. Stevenson (1986) e Foth e Ellis (1997) colocam-na a par da fotossíntese e respiração.

Os organismos que fixam N_2 são designados de diazotrofos. Podem ser heterotróficos, autotróficos fotossintéticos ou quimioautotróficos. Na sua relação com o oxigénio (O_2) podem ser aeróbios, anaeróbios facultativos ou anaeróbios obrigatórios (Havelka *et al.*, 1982; Harris, 1988; Paul e Clark, 1996). A capacidade de fixar azoto depende do estabelecimento de relações de maior ou menor especificidade com plantas superiores. Os microrganismos livres (fixadores livres) têm menor capacidade de fixação relativamente aos sistemas fixadores de elevada especificidade microrganismo/hospedeiro, como as associações e as relações de simbioses (Mengel e Kirkby, 1987).

Os sistemas simbióticos de elevada especificidade que se estabelecem entre espécies da família *Leguminosae* e bactérias da família *Rhizobiaceae* são as mais importantes em ecossistemas naturais e agrícolas pela sua distribuição geográfica e pela sua capacidade de fixação. Dada a sua importância agronómica, são também os sistemas fixadores melhor estudados (Harris, 1988). Questões relacionadas com a natureza e especificidade da infecção, nodulação e bioquímica do processo de fixação podem ser vistos em Mengel e Kirkby (1987), Lynch e Wood (1988) ou Paul e Clark (1996).

A capacidade de fixação nos sistemas simbióticos associados às leguminosas ultrapassa, frequentemente, os $100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Paul e Clark (1996) referem medições em leguminosas forrageiras onde se chegaram a registar valores de $800 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. As quantidades fixadas são, contudo, muito variáveis, dependendo das condições ecológicas de cada região. Holding (1982) refere que, no Reino Unido, a luzerna pode fixar entre 56 a 463 kg N ha^{-1} e os trevos 45 a 673 kg N ha^{-1} . Atendendo à grande variação na quantidade de azoto

fixado, parece haver ainda grande margem de progresso na promoção da eficiência do processo. Holding (1982) discute as linhas prioritárias de investigação neste domínio. Encontrar combinações de estirpes de rizóbio/leguminosas mais eficientes e que continuem a fixar N_2 na presença de azoto mineral no solo são das mais importantes. Outra linha de grande interesse consiste na tentativa de transferir a capacidade fixadora das leguminosas para outras culturas, como o milho e o trigo (Havelka *et al.*, 1982).

O efeito favorável da inclusão de leguminosas na rotação é referido pelos escritores romanos de há mais de 2000 anos (Paul e Clark, 1996). Durante séculos, juntamente com a aplicação de estrumes, foram as principais formas de fornecer azoto às plantas não leguminosas (Tisdale *et al.*, 1985). O aparecimento e o reduzido custo dos fertilizantes azotados de síntese diminuiu o interesse por estas culturas. Nos últimos anos, por motivações ecológicas, parece haver renovado interesse na inclusão de leguminosas na rotação. A fixação biológica surge como alternativa ou suplemento aos fertilizantes industriais.

A inclusão de leguminosas na rotação apresenta vantagens óbvias pela reduzida ou nula necessidade de azoto destas culturas. Do processo beneficiam também as culturas que se seguem na rotação, pela posterior disponibilidade do azoto dos resíduos da leguminosa. Contudo, há também alguns inconvenientes. Um deles é que o processo tende a acidificar o solo (Haynes, 1983). Por outro lado, o azoto contido em resíduos orgânicos é, normalmente, utilizado de forma pouco eficiente, devido à falta de sincronismo entre a libertação do nutriente e as necessidades das culturas seguintes (Griffin e Hesterman, 1991).

2.1.1.2 - Deposições atmosféricas

Nas deposições atmosféricas é comum serem incluídos os compostos azotados que chegam ao solo com a água da chuva (deposições atmosféricas húmidas) e as deposições atmosféricas secas relacionadas com a adsorção de NH_3/NH_4^+ directamente pelo solo (Legg e Meisinger, 1982; Wild, 1988). Holding (1982) inclui, nas deposições atmosféricas secas, o azoto na forma de sais de amónio contido em partículas de aerossóis.

A água da chuva contém diversos compostos azotados, designadamente NH_3/NH_4^+ , os iões nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) e azoto orgânico. A forma dominante é o NH_3 (Olson e Kurtz, 1982; Paul e Clark, 1996). O NH_3 surge na atmosfera por volatilização a partir da superfície do solo e pela oxidação dos combustíveis fósseis e fogos naturais (Stevenson, 1986). A origem do NO_3^- é mal conhecida, acreditando-se que cerca de 10 a 20 % seja formado pelas descargas eléctricas das trovoadas (Tisdale *et al.*, 1985; Stevenson, 1986).

Segundo Tisdale *et al.* (1985), a maior parte estará associada à actividade industrial. Os nitritos ocorrem em níveis vestigiais e são ignorados ou incluídos nos nitratos (Stevenson, 1986). O azoto orgânico tem origem nas poeiras cósmicas e em partículas orgânicas levantadas do solo, sendo o seu significado relativo reduzido (Tisdale *et al.*, 1985; Stevenson, 1986).

As deposições atmosféricas de azoto são consideradas de grande importância em ecossistemas naturais. Contudo, o seu significado agrícola é mais limitado, devido às grandes necessidades em azoto das plantas cultivadas. Eventualmente, revestem-se de alguma importância em zonas próximas de fontes emissoras (Wild, 1988).

O azoto anualmente depositado pela precipitação varia consideravelmente entre regiões. Nas regiões polares, na ausência de fontes antrópicas poluentes, representa menos de 1 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto nas Ilhas Britânicas, os valores médios situam-se nos 15 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Holding, 1982). Hoefl *et al.* (1972) mediram deposições anuais de azoto entre 13 e 30 kg ha⁻¹ em várias localidades do Estado norte-americano do Wisconsin. Os valores médios anuais foram estimados em 20 kg N ha⁻¹. Para o amoníaco (NH₄⁺) e o azoto orgânico, a principal fonte de variação encontrada foi a proximidade a aviários. Durante o ano, a quantidade de N-NH₄⁺ depositada foi mais elevada na Primavera e mais baixa no Inverno. A deposição de N-NO₃⁻ foi idêntica entre localidades, tendo-se registado apenas um ligeiro aumento nos meses de Primavera relativamente aos meses de Inverno. Na República Checa, Balík *et al.* (1994) estimaram valores médios de 20 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ entre deposições atmosféricas húmidas e secas. No Noroeste de Portugal (Vila Cova), Trindade (1987) registou valores de azoto depositado (deposições atmosféricas húmidas e secas) de 16,7 e 27,9 kg N ha⁻¹ em 1994/95 e 1995/96, respectivamente. A forma amoniacal representou 88 % do azoto depositado. No Verão, a concentração de N-NH₄⁺ na água era mais elevada, mas a quantidade depositada aumentava no Inverno devido à concentração da precipitação.

A possibilidade dos solos adsorverem azoto directamente da atmosfera foi sugerido já em 1847 por Liebig (Malo e Purvis, 1964). A capacidade de adsorção do solo depende da concentração de NH₃ na atmosfera e de factores como a permeabilidade e o teor de humidade do solo (Legg e Meisinger, 1982; Wild, 1988). A opinião actual é que o processo tem pouco significado agrícola, excluindo zonas com atmosferas excepcionalmente ricas em NH₃, devido à proximidade de fontes emissoras, como a actividade pecuária e industrial (Legg e Meisinger, 1982; Wild, 1988). Contudo, este componente do ciclo do azoto terá ganho importância nas últimas décadas devido ao aumento das emissões antrópicas.

Em estudos de campo efectuados durante os anos de 1958-60 na região de New Jersey, cuja atmosfera parece ser particularmente rica em NH_3 , Malo e Purvis (1964) registaram deposições compreendidas entre 21 e 83 kg N ha^{-1} ano^{-1} , dependendo do tipo de solo. Os autores consideraram que aqueles solos adsorveram $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ em quantidade suficiente para aumentar a sua fertilidade e responsabilizaram esta fonte de azoto pela elevada produtividade do milho nas modalidades testemunha. Em Inglaterra, na estação experimental de *Rothamsted*, têm sido registados valores médios anuais de 4 kg N ha^{-1} (Wild, 1988).

2.1.1.3 – Absorção de azoto pela canópia

Nas plantas terrestres, os estomas são locais de trocas gasosas com a atmosfera. Elementos nutrientes na forma de gases, como o NH_3 , o dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de azoto N_2O e NO_x podem entrar e sair da planta através dos estomas (Marschner, 1986).

Denmead *et al.* (1978) consideram que as trocas de NH_3 entre plantas, solos e águas estão devidamente documentadas e que nalgumas situações podem assumir importância na nutrição das plantas e na fertilidade dos solos. Utilizando técnicas micrometeorológicas, os autores identificaram a existência de um ciclo em que o NH_3 originado no solo era rapidamente absorvido pela vegetação ou adsorvido pelo solo.

O potencial de absorção de NH_3 parece ser bastante elevado. Lemon e Houtte (1980) consideram que as plantas têm elevada afinidade para o NH_3 . Os autores verificaram que durante o dia, quando os estomas estavam abertos, o NH_3 no interior da canópia de uma pastagem atingia níveis muito baixos, sendo absorvido pelas plantas e rapidamente metabolizado em aminoácidos e proteínas. À noite, os níveis de NH_3 aumentavam de novo. Lemon e Houtte (1980) identificaram também a existência de um ponto de compensação para o NH_3 . Segundo Wild (1988), esse ponto está próximo da concentração média de NH_3 na atmosfera (3 ppbv), valor equivalente à pressão parcial para a qual o fluxo de NH_3 entre as plantas e a atmosfera é zero. Em situações locais, de concentração atmosférica mais elevada, é de esperar que as plantas absorvam NH_3 e abaixo desse ponto percam NH_3 . Na prática, o contributo real da absorção pela canópia parece ter pouco significado.

O óxido nítrico (NO) aparece na atmosfera com origem na oxidação da biomassa e combustíveis fósseis e em processos microbiológicos. O óxido nítrico (NO_2) é o principal produto da oxidação do NO atmosférico (Weber e Rennenberg, 1996). O óxido nítrico, devido à sua reduzida solubilidade em água, praticamente não é absorvido pelas plantas. Weber e Rennenberg (1996) referem nunca terem sido encontrados efeitos visíveis no

crescimento das plantas mesmo se expostas a atmosferas enriquecidas neste composto. Pelo contrário, o NO_2 é rapidamente absorvido através das folhas, solubilizado na fase aquosa do apoplasto e convertido em nitratos e nitritos.

Weber e Rennenberg (1996) estudaram a absorção de óxidos de azoto pelas plantas, utilizando monolitos de trigo. Registaram perdas líquidas de NO e deposições líquidas de NO_2 na canópia. A quantidade de NO_2 absorvida foi quinze vezes superior às perdas de NO. As estimativas dos balanços anuais foram de emissão de $0,87 \text{ kg N-NO ha}^{-1}$ e deposições de $12,73 \text{ kg N-NO}_2 \text{ ha}^{-1}$.

A importância agronómica da absorção de azoto pela canópia é questionável. Contudo, o seu papel pode ser decisivo na remoção de contaminantes da atmosfera em locais de elevada acumulação potencial. No entanto, em zonas poluídas, o crescimento das plantas pode ser inibido pela absorção destes gases em quantidades elevadas (Marschner, 1986).

2.1.1.4 – Entrada de azoto nos solos agrícolas por processos não naturais

Nos ecossistemas terrestres naturais, o balanço anual de azoto está em equilíbrio e as entradas e saídas são mínimas. Nos sistemas agrícolas, os fluxos de entrada e saída são várias vezes superiores. Nestes sistemas, o aumento das perdas está associado à mineralização activa das reservas orgânicas e subsequente remoção de azoto pelas culturas, lixiviação, volatilização e erosão. O homem intervém, tentando contrariar o desequilíbrio gerado através do recurso à adição de substâncias fertilizantes (Bolin e Arrhenius, 1977). As entradas de azoto no solo por processos não naturais são normalmente menos discutidas nas revisões e estudos sobre o ciclo do azoto. A principal razão será, certamente, porque as quantidades envolvidas são quantificáveis e também em grande extensão manipuláveis pelo homem.

A quantidade de azoto que entra devido ao uso de fertilizantes atinge valores da ordem de 200 a 800 kg N ha^{-1} , dependendo da cultura e da disponibilidade natural de azoto no solo (Newbould, 1989). O azoto introduzido pela água de rega pode ser muito variável, atendendo à quantidade e qualidade da água utilizada. Rodrigues (1995), estimou em 11 kg N ha^{-1} , a quantidade de azoto introduzido pela água de rega durante a estação de crescimento da cultura da batata na região de Bragança. Trindade (1997) apresenta valores inferiores (4 a 7 kg N ha^{-1}) para a cultura do milho no Noroeste. O contributo das sementes é frequentemente ignorado. Contudo, na cultura da batata podem ser introduzidos quantidades superiores a 10 kg N ha^{-1} , se se admitir a utilização de um calibre/semente 45-60 da cv. Désirée (peso médio de $90 \text{ g tubérculo}^{-1}$), numa densidade de plantação de $44\,000 \text{ tubérculos ha}^{-1}$ e considerando

um teor médio de azoto total nos tubérculos de 1,2 %. A fixação biológica de N_2 , embora tratando-se de uma entrada de azoto por um processo natural, tem sido fortemente promovida pelo homem, não só recorrendo a uma prática cultural designada de sideração, que é, sobretudo, uma técnica de fertilização azotada (Löhnis, 1926; Koe, 1993), mas também pela promoção que tem sido feita da capacidade fixadora das leguminosas da rotação. Os resíduos das culturas são hoje considerados também recursos azotados importantes. Contudo, Stevenson (1986) considera tratar-se apenas da reciclagem de azoto dentro do sistema solo/planta.

2.1.2 – Disponibilidade das formas orgânicas

A disponibilidade biológica de um elemento nutriente está relacionada com a possibilidade de causar um efeito (positivo ou negativo) num organismo específico. De acordo com van Riemsdijk e Plette (1996), depende da forma química em que o elemento se encontra e do organismo considerado. Os autores exemplificam o conceito da seguinte forma: o azoto está presente na fase gasosa do solo na forma N_2 em quantidades elevadas. Contudo, a sua disponibilidade para a maioria das plantas é nula. Tal como o azoto molecular, as formas orgânicas de azoto, em geral, não estão disponíveis para as plantas. Pelo contrário, o azoto na solução do solo na forma NO_3^- está totalmente disponível, podendo a absorção prosseguir até à sua completa exaustão.

As plantas absorvem o azoto do solo sobretudo nas formas minerais NH_4^+ e NO_3^- , embora alguns compostos orgânicos solúveis possam também ser utilizados pelas plantas sem serem convertidos em formas minerais (Campbell, 1978).

Os quinze centímetros superficiais dos solos agrícolas das regiões temperadas contêm entre 2 a 6 Mg N ha^{-1} . Mais de 90 a 95 % deste azoto aparece na forma orgânica. Das formas minerais, assumem particular importância os iões NO_3^- e NH_4^+ , estando grande parte do último retido nos minerais de argila (Wild, 1988). Da elevada quantidade de azoto orgânico nos solos agrícolas, apenas uma fracção reduzida e muito variável fica anualmente disponível para as plantas. A conversão do azoto orgânico em formas minerais é um processo biológico complexo, que depende de inúmeros factores, como a quantidade e características do material a decompor, a presença de uma dada população microbiana e condições ambientais que favoreçam a sua actividade (Franco e Munns, 1982).

Apesar da dedicação dos investigadores a esta matéria e do conseqüente volume de informação disponível sobre as transformações dos substractos orgânicos no solo, a

complexidade do processo concorre para tornar extraordinariamente difícil prever o contributo da mineralização de azoto orgânico para a nutrição azotada das plantas.

2.1.2.1 – Mineralização e imobilização biológica de azoto

A mineralização do azoto é normalmente entendida como o processo biológico através do qual as substâncias orgânicas complexas são convertidas nas formas minerais NH_4^+ e NO_3^- (Jansson e Person, 1982; Stevenson, 1986; Harris, 1988; Santos, 1996). Alguns autores (Tisdale *et al.*, 1985; Santos, 1996) distinguem no processo três grupos de reacções principais: (i) aminização, que corresponde à decomposição das grandes moléculas orgânicas em compostos simples como aminoácidos e amins pela acção de enzimas extracelulares produzidas por microrganismos heterotróficos do solo; (ii) amonificação, que consiste na oxidação destes compostos por enzimas intracelulares de outros grupos de heterotróficos com libertação de NH_4^+ ; e (iii) nitrificação, que corresponde à oxidação biológica do NH_4^+ a NO_3^- por bactérias autotróficas do solo. Stevenson (1982, 1986) não distingue entre aminização e amonificação, designando o processo geral da transformação das formas orgânicas a NH_4^+ de amonificação. Paul e Clark (1996) definem mineralização como a degradação de proteínas, açúcares aminados e ácidos nucleicos a NH_4^+ , ficando excluída, também desta definição, a nitrificação.

A ureia é uma molécula orgânica cuja origem no solo pode resultar de dejectos de animais ou da aplicação pelo homem como fertilizante de síntese. A sua decomposição é uma reacção importante nos processos de amonificação. Segundo Gasser (1964), a urease, responsável pela hidrólise da ureia, está entre as enzimas do solo mais estudadas. A sua actividade depende de factores bióticos e abióticos. Em solos com actividade biológica elevada, a ureia é rapidamente hidrolisada a carbamato de amónio e carbonato de amónio, que por sua vez se decompõe com formação de $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ e dióxido de carbono (CO_2).

Durante o processo de decomposição dos materiais orgânicos só surge NH_4^+ , como produto de reacção, se o azoto no substrato a decompor estiver presente em quantidades globalmente superiores às necessidades dos microrganismos. Se o substrato orgânico tiver pouco azoto, os microrganismos podem mesmo utilizar azoto inorgânico do solo. O ião NH_4^+ é a forma mineral preferida pelos microrganismos, embora também possam utilizar NO_3^- (Allison, 1966; Recous *et al.*, 1988; Kamukondiwa *et al.*, 1996; Paul e Clark, 1996). A utilização de azoto inorgânico do solo pelos microrganismos durante a decomposição dos

resíduos é designada de imobilização biológica de azoto (Jansson e Person, 1982; Harris, 1988).

Barak *et al.* (1990) demonstraram que certos aminoácidos, como a glicina e a leucina, podem ser incorporados directamente nos tecidos microbianos sem passarem pela forma inorgânica. Embora os autores refiram que a quantidade de compostos orgânicos solúveis seja insignificante relativamente ao azoto inorgânico, parece haver necessidade de se redefinir o conceito de imobilização biológica. Barak *et al.* (1990) sugerem que imobilização biológica deve ser entendida como a utilização de azoto mineral e/ou orgânico pela biomassa microbiana.

No solo, os processos de mineralização e imobilização, definidos anteriormente, ocorrem em simultâneo (Jansson e Persson, 1982; Mary *et al.*, 1996). O balanço, traduzido pelo aumento ou diminuição de azoto mineral no solo, define, respectivamente, mineralização líquida e imobilização líquida. Na perspectiva da disponibilidade de azoto para as plantas, no curto prazo, o resultado líquido do processo é o aspecto mais decisivo. Contudo, o saldo, só por si, pouco informa sobre a actividade biológica do solo. Uma actividade intensa dos processos mineralização e imobilização pode estar a ocorrer e o saldo ser nulo. Mesmo em períodos de mineralização líquida, a imobilização biológica continua e, igualmente, a mineralização não pára quando a imobilização é o processo dominante (Mary *et al.*, 1996).

A imobilização de azoto é um fenómeno temporário. Coincide com o aumento da biomassa microbiana do solo associada à decomposição de resíduos. Com a exaustão ou redução do substrato, a população microbiana começa a decrescer pela morte dos microrganismos. Da mineralização dos seus corpos resulta a libertação do azoto imobilizado. A imobilização temporária do azoto reduz a disponibilidade do nutriente para as plantas. O azoto inorgânico é utilizado pelos microrganismos de uma forma muito rápida se existir carbono disponível (Stojanovic e Broadbent, 1956; Allison, 1966; Chichester *et al.*, 1975; Zaccheo *et al.*, 1993). Zaccheo *et al.* (1993) adicionaram ao solo glucose como fonte de C e azoto inorgânico. Verificaram que ao fim de 12 e 96 horas tinha sido imobilizado, respectivamente, 25 e 96 % do azoto inorgânico inicialmente presente.

A imobilização de azoto inorgânico pelos microrganismos, ainda que temporária, pode ter um efeito desfavorável nas plantas pela privação de azoto nas fases imediatas à aplicação de certos materiais orgânicos ao solo. Pelo contrário, ocorrendo no tempo certo, pode fornecer uma protecção também temporária às formas minerais de azoto no solo contra perdas associadas a fenómenos de lixiviação e volatilização (Olson *et al.*, 1979). Ng Kee Kwong *et al.* (1986) demonstraram a importância da imobilização biológica na prevenção da lixiviação

do azoto em climas tropicais húmidos e em solos dominados por óxidos de ferro e alumínio com reduzida capacidade para reter NH_4^+ . Contudo, a imprevisibilidade do processo mineralização/imobilização e, sobretudo, da taxa e dos períodos em que o azoto é remineralizado, não tem permitido uma utilização eficiente do azoto dos fertilizantes orgânicos.

2.1.2.2 - Factores que afectam o processo mineralização/imobilização

São diversos os factores identificados que influenciam a actividade dos microrganismos e, conseqüentemente, o processo mineralização/imobilização. Trindade (1997) reviu, de uma forma bastante exaustiva, a globalidade desses factores. Neste trabalho será feita apenas uma breve referência a alguns dos mais importantes, como a composição do substrato, a temperatura, a humidade e o arejamento do solo e a adição de fertilizantes.

2.1.2.2.1 – Composição do substrato

O efeito da composição dos substratos orgânicos na mineralização de azoto tem sido, sem comparação, o factor mais estudado ao longo dos anos (p. ex. Waskman e Tenney, 1927; Jenkinson, 1971; Kanamori e Yasuda, 1979; Vigil e Kissel, 1991; Trehan e Wild, 1993; Zaccheo *et al.*, 1993; Green e Blackmer, 1995; McKeeney *et al.*, 1995). Nos materiais de origem vegetal, as partes solúveis em água são decompostas mais rapidamente, seguidas da celulose e hemicelulose, com taxas idênticas. A lenhina é a fracção mais resistente. Contudo, as diferenças de comportamento entre materiais parece residir apenas nas fases iniciais do processo. Numa vasta gama de resíduos, Jenkinson (1971) verificou que nos primeiros meses a taxa de decomposição era rápida e dependente da composição dos resíduos. Após a fase inicial, a taxa de decomposição foi surpreendentemente semelhante. Verificou também que, após a primeira fase, as condições ambientais exerceram pouca influência no processo de mineralização.

A razão entre o teor de carbono e o teor de azoto dos materiais orgânicos (razão C/N) tem sido o parâmetro mais utilizado para prever o balanço inicial do processo. Normalmente interessa saber se imediatamente após a sua aplicação ao solo é de esperar mineralização ou imobilização líquida. Desde sempre se tentaram definir valores de razão C/N que pudessem prever o resultado líquido da processo. A maior parte dos autores aceita valores de equilíbrio entre mineralização e imobilização compreendidos entre 20 e 30 (Harmsen e van Schreven,

1955; Stojanovic e Broadbent, 1956; Franco e Munns, 1982; Holding, 1982; Stevenson, 1986; Paul e Clarck, 1996). A este valor corresponde, normalmente, um teor de azoto total entre 1,5 a 2 %. Acima do valor C/N de equilíbrio é de esperar que ocorra imobilização líquida e abaixo desse ponto mineralização líquida.

A utilização da razão C/N para prever o comportamento dos materiais orgânicos aplicados ao solo não é, contudo, uma medida infalível. Jansson e Persson (1982) consideram que a razão C/N é uma aproximação, nem sempre segura, à relação entre a disponibilidade de energia e de azoto nos substratos. As lenhinas, por exemplo, têm razão C/N muito elevada e, contudo, não causam imobilização substancial de azoto porque, embora tenham muito carbono, são uma fonte de energia modesta para a maior parte dos microrganismos. A incapacidade de se prever adequadamente a disponibilidade de azoto para as plantas com base na razão C/N dos resíduos orgânicos tem sido salientada por diversos autores (Kanamori e Yasuda, 1979; McKeeney *et al.*, 1995; Matos, 1997).

2.1.2.2.2 – Temperatura

Dentro de uma gama de variação aceitável, a temperatura influencia a taxa de decomposição dos resíduos, mas não as características gerais do processo (Jenkinson e Ayanaba, 1977; Jenkinson, 1988). Consequentemente, os solos de climas quentes têm taxas de mineralização mais elevadas e teores de matéria orgânica mais baixos. Gaiser *et al.* (1994) registaram taxas de mineralização anuais de 13 % na República do Benin (África Ocidental). Para efeitos de comparação, citam resultados obtidos em climas mais frios do Norte da Europa, onde os valores são inferiores a 1 %. Jenkinson e Ayanaba (1977) verificaram que o processo de decomposição de resíduos de sorgo foi quatro vezes mais rápido na Nigéria que em Inglaterra. Pelas mesmas razões, Mengel (1996) refere que, em climas temperados, as taxas de mineralização são mais elevadas no Verão que no Inverno, desde que a humidade não seja factor limitante.

Alguns investigadores têm tentado encontrar relações quantitativas do efeito da temperatura na taxa de mineralização. Stanford *et al.* (1973) encontraram um valor de Q_{10} igual a 2, numa gama de temperaturas de 5 a 35 °C, em vários solos dos Estados Unidos. O valor de Q_{10} traduz a variação na taxa de mineralização por cada incremento de 10 °C na temperatura. Contudo, a relação parece não ser tão simples. Em estudos posteriores, Jenkinson (1988) encontrou valores de Q_{10} ligeiramente mais elevados e De Neve *et al.*

(1996) encontraram valores bastantes diferentes dos de Stanford *et al.* (1973) e dependentes do tipo de resíduo.

2.1.2.2.3 – Humidade

A relação entre a disponibilidade de água no solo e a mineralização é surpreendentemente simples, atendendo à importância da água para os processos biológicos. Quando a mineralização (y) e o teor de humidade (x) foram expressos em termos relativos, isto é, associando a mineralização máxima ($y = 100$) ao teor de humidade óptimo ($x = 100$), Stanford e Epstein (1974) verificaram que o azoto mineralizado aumentava de forma linear ($y = x$) desde o coeficiente de emurchecimento (-1,5 MPa) até à capacidade de campo (-0,03 MPa). À medida que o teor de humidade se afastava destes limites, a mineralização decrescia. Desta forma, parece fácil prever a influência dos fluxos de humidade na mineralização.

Em anaerobiose, a decomposição dos materiais orgânicos é lenta e incompleta. A mineralização e a imobilização continuam, embora a taxas menores. Os microrganismos anaeróbios necessitam menos azoto que os aeróbios. Consequentemente, o NH_4^+ tende a acumular-se (Rice e Havlin, 1994). Certos compostos, como a lenhina, não chegam a ser decompostos na ausência de oxigénio (O_2). Jenkinson (1988) refere que as turfas contêm resíduos parcialmente humificados que, em condições anaeróbias, podem permanecer indefinidamente sem serem atacados.

O arejamento do solo está directamente relacionado com o teor de humidade. O coeficiente de difusão do oxigénio na água é 10 000 vezes mais baixo que no ar. Contudo, a pressão de O_2 na atmosfera pode diminuir 10 000 vezes sem que a taxa respiratória se tenha reduzido duas vezes (Jenkinson, 1988).

2.1.2.2.4 - Adição de fertilizantes

Com a introdução do isótopo ^{15}N nos estudos de eficiência de recuperação de azoto pelas plantas, verificou-se que a adição de fertilizantes minerais ou orgânicos podia estimular a mineralização da matéria orgânica nativa do solo, sendo, consequentemente, absorvido mais azoto dessa fonte. O fenómeno foi designado, por Bingeman *et al.* (1953), de efeito *priming* (rastilho), tendo posteriormente Jenkinson *et al.* (1985) proposto o termo *added nitrogen interaction* (ANI). A hipotética importância do efeito *priming* ou ANI na disponibilidade de azoto para as plantas levou à condução de numerosa investigação (p. ex. Bingeman *et al.*,

1953; Broadbent, 1965; Aleksic *et al.*, 1968; Jenkinson, 1971; Westerman e Kurtz, 1973; Pomares-Garcia e Pratt, 1978 a; Olson, 1980; Olson e Swallow, 1984; Jenkinson *et al.*, 1985; Hart *et al.*, 1986; Walters e Malzer, 1990 b; Rao *et al.*, 1991; Schnier, 1994; Blackmer e Green, 1995). Contudo, Blackmer e Green (1995) consideram que grande parte dos resultados entretanto obtidos devem ser questionados por deficiente interpretação.

Jenkinson *et al.* (1985) entendem ser necessário distinguir dois tipos de efeito: (i) um ANI real, se da adição dos fertilizantes resultar um estímulo na mineralização do azoto orgânico do solo; e (ii) um ANI aparente, se o efeito registado resultar apenas da troca entre as diferentes fracções de azoto no solo (*pool substitution*). A troca de azoto entre as diferentes fracções ocorre porque o ^{15}N se mistura com o azoto do solo que está continuamente a ser mineralizado, sendo depois imobilizado pelos microrganismos de forma indiscriminada. Desta forma, as plantas recuperam mais azoto do solo e menos do fertilizante, sem que isso de deva a um ANI real mas sim à troca entre fracções.

Westermann e Kurtz (1973) registaram um aumento do contributo do solo para a nutrição azotada do sorgo nas modalidades fertilizadas relativamente à modalidade testemunha (*priming* positivo). Atribuíram o resultado ao aumento da mineralização do azoto orgânico do solo pelo estímulo causado pelo fertilizante na actividade microbiana. Outras justificações têm sido apresentadas para explicar a observação de efeitos *priming* positivos, como o efeito salino (Broadbent, 1965; Broadbent e Nakashima, 1967; Poovarodom e Tate, 1988), reacções proteolíticas (Laura, 1975) e melhor desenvolvimento do sistema radicular nas modalidades fertilizadas (Olson e Swallow, 1984). Nos estudos mais recentes, a recuperação de mais azoto do solo nas modalidades fertilizadas relativamente à testemunha tem sido justificado pela troca entre fracções (Jenkinson *et al.*, 1985; Hart *et al.*, 1986; Walters e Malzer, 1990 b; Rao *et al.*, 1991; Schnier, 1994; Blackmer e Green, 1995).

Jenkinson (1971), sem excluir a possibilidade da existência de um estímulo na actividade microbiana pela aplicação dos fertilizantes, considera o seu efeito no aumento da mineralização do azoto do solo insignificante, quando comparado com o total da mineralização anual do azoto orgânico.

2.1.2.3 – Estabilidade do azoto imobilizado

A imobilização biológica de azoto é um processo muito rápido e algum azoto imobilizado aparece, passado pouco tempo, em estruturas orgânicas altamente estáveis (Legg

et al., 1971). Contudo, a estabilização desse azoto é um processo lento e contínuo até se atingir o equilíbrio com o azoto nativo (Allen *et al.*, 1973).

Stewart *et al.* (1963) verificaram que o azoto imobilizado apareceu nas fracções *azoto solúvel em ácido não destilável, solúvel em ácido destilável e insolúvel em ácido*. Contudo, os resultados demonstraram também que o azoto não tinha sido imobilizado em todas as fracções por igual. A maior parte encontrava-se na fracção solúvel em ácido não destilável. Smith *et al.* (1978) encontraram azoto em todas as fracções da matéria orgânica que analisaram logo após o primeiro ano da sua aplicação. Contudo, após três anos, ainda não se encontrava homogeneamente distribuído com o azoto nativo. Smith *et al.* (1978) verificaram, também, que, durante os três anos, o azoto imobilizado foi duas vezes mais susceptível à mineralização que o azoto nativo do solo.

As técnicas de fraccionamento que utilizam os isótopos radioactivos ^{14}C ou ^{15}N têm sido usadas para esclarecer as estruturas químicas da matéria orgânica e para atribuir significado biológico às suas diversas fracções. Estes estudos têm indicado que a matéria orgânica não se degrada por igual. Vários autores têm proposto a separação das fracções da matéria orgânica pelo grau de estabilidade. Jenkinson (1971) separou as fracções resíduos frescos, biomassa, metabolitos da actividade microbiana e constituintes das paredes celulares adsorvidos aos colóides e húmus estável. Os resíduos frescos e a biomassa são as fracções que mais contribuem para a libertação de azoto para as plantas. Jansson e Persson (1982) estimaram que, nos solos agrícolas, a fracção da matéria orgânica facilmente mineralizável representa 10 a 15 % da matéria orgânica total. Contudo, é opinião generalizada que as técnicas de fraccionamento não têm conseguido separar a matéria orgânica em fracções com significado biológico (Vanlauwe *et al.*, 1994; Jarvis *et al.*, 1996).

2.1.3 - Disponibilidade das formas minerais de azoto

2.1.3.1 – Azoto nítrico e azoto amoniacal não especificamente ligado

Apenas uma reduzida fracção de azoto, geralmente menos de 0,1 %, existe, num dado instante, nas formas minerais NO_3^- e NH_4^+ (Stevenson, 1986). Estas formas minerais de azoto resultam de transformações biológicas ou são introduzidas pelo homem. A sua acumulação no solo é temporária e os seus níveis variam diariamente e de uma estação de crescimento para outra, dependendo de factores ambientais e culturais.

O ião NO_3^- é um elemento muito móvel, podendo percorrer distâncias apreciáveis, já que não está sujeito a fenómenos de retenção química ou física. A sua adsorção está limitada a situações em que as cargas positivas de superfície têm significado, não sendo, contudo, sujeito a uma adsorção específica (Coutinho, 1989). Na prática, segundo Mengel (1985), o NO_3^- está totalmente disponível para as plantas. Deste modo, o ião permanece no solo até ser absorvido, lixiviado ou desnitrificado (Coutinho, 1989).

Os elementos móveis como os nitratos chegam às raízes por fluxo de massa ou por difusão (Westermann e Davies, 1992). O fluxo de massa consiste no movimento de iões em solução transportados pelo fluxo de água em resultado do défice hídrico junto das raízes, provocado pela transpiração das plantas (Mengel, 1985; Coutinho, 1989). Se o fluxo de massa não transporta a quantidade suficiente de nutriente para as plantas gera-se um gradiente de concentração. O movimento de iões para a superfície das raízes em consequência deste gradiente foi definido como difusão (Mengel, 1985; Coutinho, 1989).

O ião NH_4^+ de troca está em equilíbrio com o NH_4^+ da solução. Desta forma, o NH_4^+ adsorvido no complexo de troca está igualmente disponível para as plantas que o NH_4^+ em solução (Harmsen e Lindenberg, 1949). Contudo, em solos com capacidade de troca catiónica significativa, a adsorção pode conferir temporariamente uma protecção efectiva contra a lixiviação. Esta forma mineral de azoto chega às raízes sobretudo por difusão (Mengel, 1985; Coutinho, 1989).

A forma mineral predominante nos solos agrícolas é o NO_3^- . Em solos arejados e de reacção não excessivamente ácida a quantidade de NH_4^+ não especificamente ligado é baixa, devido à imobilização biológica preferencial relativamente ao NO_3^- (Jansson, 1963; Recous *et al.*, 1988) e à nitrificação. O ião NH_4^+ é frequentemente ignorado quando se determina o azoto mineral no solo (Mengel, 1985).

2.1.3.2 – NH_4^+ retido nos minerais de argila

Os minerais de argila podem reter catiões no seu interior para neutralizar as cargas negativas provenientes das substituições isomórficas. Segundo Nommik e Vahtras (1982), a principal teoria sobre a retenção do NH_4^+ refere que, dadas as dimensões deste ião (e do potássio) na sua forma desidratada, ambos encaixam perfeitamente nas cavidades hexagonais formadas pelos átomos de oxigénio das superfícies externas entre duas unidades estruturais dos minerais de argila do tipo 2:1. Quando essas cavidades são ocupadas por NH_4^+ e/ou K^+ , a estrutura do mineral contrai e os catiões ficam aprisionados. Os catiões de diâmetro superior,

como as formas hidratadas de cálcio (Ca^{++}), magnésio (Mg^{++}) e sódio (Na^+) não encaixam nessas cavidades, movendo-se de forma mais livre no interior da estrutura dos minerais.

Do ponto de vista analítico, o NH_4^+ retido distingue-se do NH_4^+ de troca na medida em que o primeiro resiste à remoção pelas soluções salinas neutras, tipo KCl 1 e 2 M e K_2SO_4 0,5 M, normalmente usadas para extrair iões (Young e Aldag, 1982; Green *et al.*, 1994; Mulvaney, 1996).

Sendo um fenómeno associado a minerais secundários, os solos com maiores teores de argila têm normalmente maior capacidade de retenção que os solos mais arenosos. Liang e MacKenzie (1994) verificaram que, dependendo da dose (170 e 400 kg N- NH_4^+ ha⁻¹), um solo argiloso reteve, respectivamente, 50 e 68 kg N ha⁻¹, e um solo arenoso reteve apenas 18 kg N ha⁻¹, independentemente da dose, evidenciando uma rápida saturação da sua capacidade de retenção. Entre minerais de argila, a capacidade de retenção considera-se exclusiva dos minerais do tipo 2:1 e entre estes é maior nas vermiculites, embora as ilites muito alteradas também possam reter quantidades apreciáveis de NH_4^+ (Nommik e Vahtras, 1982).

A importância agronómica do NH_4^+ retido é ainda controversa. Alguns autores referem que esta forma de azoto tem pouco significado (Legg e Allison, 1959). Outros atribuem-lhe grande importância e consideram que as estratégias de fertilização devem ter em conta o potencial de retenção do solo (Praag *et al.*, 1980; Mengel, 1985; Green *et al.*, 1994; Liang e MacKenzie, 1994).

A disponibilidade do azoto recentemente retido é um processo lento e gradual, enquanto a retenção é um processo rápido (Green *et al.*, 1994; Liang e MacKenzie, 1994). Apesar disso, Praag *et al.* (1980) consideram que a libertação do azoto retido é mais rápida que a do azoto imobilizado biologicamente. Green *et al.* (1994) verificaram que 20 dias após o fim do período de retenção (20 dias numa incubação anaeróbia), 45 % do azoto retido tinha sido libertado. Tisdale *et al.* (1985) citam estudos em que 66% do azoto retido foi libertado no primeiros 85 dias após a retenção e a totalidade ao fim de 426 dias.

O NH_4^+ interlamelar decresce durante a estação de crescimento das plantas (Mengel e Scherer, 1981). Mengel (1991) considera que nos solos com elevada capacidade de retenção, esta fonte de azoto pode ser mais importante para a nutrição das plantas que o azoto inorgânico presente no perfil no início da estação de crescimento. Mengel (1991) baseia-se em diversos estudos conduzidos na Alemanha, nos quais foram encontradas relações significativas entre o NH_4^+ interlamelar e a absorção pelo trigo e onde não foi encontrada qualquer relação entre o azoto inorgânico e a absorção pela cultura.

Na perspectiva da eficiência de recuperação do nutriente no curto prazo, a retenção interlamelar parece ser um inconveniente. Nommik e Vahtras (1982) admitem que a melhor forma de minimizar a retenção de NH_4^+ é a sua aplicação posterior ou em simultâneo com o K^+ . A competição entre os dois catiões pelos locais de troca diminuiria a retenção de NH_4^+ . Contudo, esta teoria tem sido criticada. Liang e Mackenzie (1994) citam trabalhos em que se verificou que a aplicação prévia de K^+ não interferiu com a retenção do NH_4^+ . Por outro lado, Chen *et al.* (1989) verificaram que a presença de K^+ induziu, mesmo, a retenção de NH_4^+ . A presença do K^+ fez com que a malha fechasse mais rapidamente, levando ao aprisionamento de outros catiões.

2.1.3.3 – Fixação de NH_3 na matéria orgânica

O amoníaco pode ser incorporado por processos não biológicos na matéria orgânica do solo. Os complexos formados são caracterizados por elevada estabilidade química e resistentes à decomposição microbiana (Parr, 1973; Nommik e Vahtras, 1982). Os mecanismos químicos são mal conhecidos, mas pensa-se envolverem a reacção do NH_3 com lenhinas oxidadas e vários grupos quinona acompanhada de polimerização (Allison, 1966; Boswell *et al.*, 1985; Paul e Clark, 1996). A quantidade de azoto fixado parece depender do carbono orgânico e do arejamento do solo. Burge e Broadbent (1961) consideram que na presença de O_2 é fixada uma molécula de NH_3 por 29 átomos de carbono, enquanto na ausência de O_2 , são necessários 45 átomos de carbono por cada molécula de NH_3 fixada.

A disponibilidade para as plantas do azoto fixado na matéria orgânica é muito baixa. Burge e Broadbent (1961) e Broadbent e Nakashima (1967) utilizando $^{15}\text{N-NH}_3$ observaram que 95 % do azoto fixado não está mais disponível para as plantas que o azoto nativo do solo, ao contrário do azoto de imobilização biológica que entra numa fracção relativamente activa. Broadbent e Nakashima (1967) consideram, também, que estas reacções não dependem do estado energético do solo. Paul e Clarck (1996) atribuem, do ponto de vista da estabilidade da matéria orgânica, um particular significado a estas reacções.

A importância destas reacções parece ser maior nos solos de reacção neutra a alcalina. Acima de pH 7, a matéria orgânica fica mais reactiva e com maior capacidade de fixar NH_3 . Uma reacção alcalina é também decisiva para garantir a presença de NH_3 no solo (Stevenson, 1986). Stevenson (1986) refere, ainda, que nos Estados Unidos, atendendo ao conhecimento destas reacções, foram patenteados produtos orgânicos enriquecidos com NH_3 e comercializados como fertilizante.

Em campo, a importância deste fenómeno é incerta. Broadbent e Nakashima (1967) sugerem que estas reacções podem estar na origem de dificuldades em explicar falhas em culturas que teriam beneficiado do azoto residual de siderações anteriores e em que as perdas por lixiviação e desnitrificação terão sido mínimas. Por outro lado, Nommik e Vahtras (1982) estimam que, num solo mineral com 2% de carbono orgânico e com a aplicação de 100 kg N ha⁻¹ na forma de NH₃, é fixado pela matéria orgânica menos de 5% do azoto adicionado. Os autores apoiam a sua tese no facto de não haver perda de eficiência pela utilização de azoto na forma NH₃ relativamente à utilização de sais sólidos de NH₄⁺.

2.1.3.4 – Transformações entre as formas minerais NO₃⁻ e NH₄⁺

2.1.3.4.1– Nitrificação

O ião NH₄⁺ originado na amonificação das formas orgânicas ou em fontes diversas pode ser convertido em NO₃⁻. A oxidação biológica do NH₄⁺ a NO₃⁻ é conhecida por nitrificação. A natureza biológica da nitrificação está devidamente estabelecida desde 1898, quando Winogradsky isolou pela primeira vez bactérias nitrificantes (Schmidt, 1982; Paul e Clark, 1996).

A nitrificação ocorre em duas fases distintas. Inicialmente o NH₄⁺ é convertido em NO₂⁻ e, de seguida, o ião nitrito é convertido em NO₃⁻. Os principais organismos envolvidos são bactérias quimioautotróficas aeróbias dos géneros *Nitrosomas* e *Nitrobacter*, respectivamente. Estes microrganismos obtêm o carbono de carbonatos e do dióxido de carbono e a energia da oxidação do NH₄⁺ e do NO₂⁻ (Paul e Clarck, 1996; Foth e Ellis, 1997).

A outros géneros de microrganismos tem sido identificada a capacidade de nitrificação, incluindo organismos heterotróficos, desde bactérias a fungos. Em condições ecológicas particulares, desfavoráveis à acção de *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, aqueles organismos podem ter uma contribuição importante na nitrificação (Harris, 1988; Paul e Clarck, 1996).

Atendendo ao comportamento e diferente destino que as duas formas minerais, NH₄⁺ e NO₃⁻, podem ter no solo, a nitrificação é um processo decisivo na manutenção da disponibilidade de azoto para as plantas. Uma linha de investigação a que tem sido dispensada muita atenção nas últimas décadas consiste em controlar a nitrificação, recorrendo a inibidores da actividade dos microrganismos nitrificantes, na tentativa de se assegurar, durante mais tempo, a presença da forma NH₄⁺ no solo (Prasad, 1976; Chancy e Kamprath, 1987; Walters e Malzer, 1990 a,b; Bronson *et al.*, 1992; Crawford e Chalk, 1993).

2.1.3.4.2- Factores que afectam a nitrificação

Para além do ião NH_4^+ e da presença de bactérias nitrificantes, diversas condições ambientais têm de ser favoráveis à actividade dos microrganismos para ocorrer a nitrificação. A temperatura, a humidade, o arejamento e a reacção do solo afectam a nitrificação, actuando na população presente de bactérias e/ou na sua proliferação (Mahendrappa *et al.*, 1966).

A temperatura óptima para a actividade dos microrganismos nitrificantes parece variar entre regiões, em função do seu regime térmico. Os estudos de Mahendrappa *et al.* (1966) evidenciaram uma certa adaptação dos organismos nitrificantes ao seu meio. Os autores verificaram que nos solos das regiões do Norte dos Estados Unidos a nitrificação máxima ocorria a 20-25 °C. Já em solos provenientes do Sul, com temperaturas médias mais elevadas, a nitrificação era máxima a 35 °C. Em estudos mais recentes, na Grécia, Setatou e Simonis (1996) verificaram que as taxas de nitrificação foram elevadas e semelhantes na ampla gama compreendida entre 20 e 35 °C. Fora dos limites de temperatura óptima, as taxas de nitrificação decrescem. Abaixo de 5 °C e acima de 40 °C tornam-se insignificantes (Stevenson, 1986; Harris, 1988; Paul e Clark, 1996).

Para a grande maioria dos solos, a nitrificação é máxima quando a tensão de humidade está compreendida entre -0,1 e -1 Mpa (Paul e Clark, 1996). Relativamente à mineralização, os valores óptimos ocorrem a teores de humidade mais elevados e a nitrificação reduz-se mais rapidamente à medida que os solos secam (Harris, 1988). Assim, durante o processo de secagem, pode acumular-se ião NH_4^+ . Acima da capacidade de campo, a nitrificação também se reduz, sendo nula em solos saturados (Tisdale, *et al.*, 1985).

As bactérias nitrificantes são aeróbias obrigatórias. A difusão do O_2 no solo depende de factores como textura, a estrutura e o teor de humidade (Paul e Clark, 1996). A redução da concentração de O_2 de 20 % para 11 % não causa redução apreciável na nitrificação. No entanto, com reduções no teor de O_2 de 20 % até 2,1 %, a nitrificação é reduzida em 50 %. Com níveis de O_2 inferiores a 2 % a nitrificação torna-se insignificante, terminando quando a concentração de O_2 desce abaixo de 0,2 % (Amer e Bartholomew, 1951).

Na gama de pH entre 6,0 e 8,0, a reacção do solo exerce um efeito reduzido na nitrificação. Fora destes limites, a reacção do solo exerce um efeito depressivo. Em solos ácidos, a nitrificação torna-se insignificante a pH inferior a 4,5 (Schmidt, 1982; Paul e Clark, 1996). No entanto, as relações entre a reacção do solo e a nitrificação não são claras e os valores limite de pH variam de solo para solo. Devido à nitrificação pelos heterotróficos e à

possível existência de microlocais de pH mais elevado, a formação de nitratos pode continuar a ocorrer em condições de elevada acidez (Paul e Clarck, 1996).

2.1.3.4.3 - Redução dissimilatória

Na ausência de oxigénio alguns microrganismos utilizam NO_3^- como aceitador de electrões para produzir NH_4^+ . O fenómeno é conhecido por redução dissimilatória (Paul e Clarck, 1996).

É um fenómeno sem importância em solos agrícolas arejados, sendo frequentemente ignorado em revisões sobre as transformações biológicas de azoto nos solos. Contudo, parece ter alguma importância em ensaios de incubação em anaerobiose (McKenney *et al.*, 1995).

Ao contrário da desnitrificação, em que se formam compostos voláteis que determinam saídas de azoto do solo, a redução dissimilatória seria desejável que ocorresse em maior extensão na medida em que permitiria reduzir as perdas potenciais por lixiviação e desnitrificação (McKenney *et al.*, 1995).

A redução dissimilatória deve, também, distinguir-se da redução assimilatória em que plantas verdes e os microrganismos reduzem internamente o ião NO_3^- , no processo de biossíntese de aminoácidos e proteínas (Paul e Clarck, 1996).

2.1.4 – Saída de azoto do sistema solo/planta

Em diversos estudos de balanços e eficiência de uso do azoto, tem sido verificado que apenas uma fracção variável e frequentemente reduzida é recuperada pelas plantas em crescimento e, posteriormente, exportado pelas culturas. Os resultados são normalmente justificados por lixiviação e/ou desnitrificação de nitratos ou volatilização de amoníaco. Contudo, existem outros mecanismos através dos quais o azoto pode sair do sistema, designadamente por perdas directas da canópia para a atmosfera. Em condições particulares, a erosão pode ser também um processo importante. Sabe-se, ainda, que algum azoto nas formas N_2O e NO_x pode ser perdido em condições aeróbias durante a nitrificação e outras transformações biológicas do azoto (Paul e Clark, 1996).

Rosswall e Paustian (1984) apresentam a importância relativa dos principais processos de saída de azoto dos solos a uma escala global. Segundo aqueles autores, as perdas devem-se à exportação pelas culturas (30 Tg), lixiviação (2 Tg), erosão (2 a 20 Tg), desnitrificação (1 a 44 Tg) e volatilização de amoníaco (13 a 23 Tg). Rosswall e Paustian (1984) consideram que

a grande variabilidade nalgumas estimativas se deve às dificuldades ainda existentes em medir as perdas respectivas em condições de campo. A nível local, a importância das perdas e o processo dominante através do qual ocorrem dependem das condições edafo-climáticas e dos sistemas e práticas culturais (Powlson, 1993).

2.1.4.1 – Desnitrificação biológica

A redução pelos microrganismos do NO_3^- a compostos intermédios e, posteriormente, a formas gasosas como o NO , N_2O e N_2 , é designada desnitrificação biológica. Neste processo, as formas mais oxidadas servem de aceitador terminal de electrões na cadeia respiratória (Firestone, 1982; Leffelaar e Wessel, 1988). As diversas enzimas que intervêm na desnitrificação são inibidas na presença de oxigénio, sendo, portanto, um processo anaeróbio (Paul e Clark, 1996).

Firestone (1982) considera ser este um dos processos de transformação do azoto menos compreendido, incluindo a bioquímica microbiana fundamental e a quantificação das perdas. Contudo, parece não haver dúvidas que o processo é muito activo em solos agrícolas, podendo ser perdidas quantidades apreciáveis em poucos dias. As perdas, relativamente ao azoto aplicado, podem atingir os 70 % e valores entre 10 a 30 % admite-se serem muito comuns (Boswell *et al.*, 1985).

Os efeitos negativos no meio ambiente, associados aos gases formados durante a desnitrificação, têm estimulado o interesse dos investigadores. O N_2O é um gás de estufa natural da atmosfera (Bronson *et al.*, 1992; Powlson, 1993; Jarvis *et al.*, 1994; Mosier *et al.*, 1996). Contudo, desde a revolução industrial que a sua concentração na atmosfera passou de 285 para 310 ppbv, com um aumento anual de 0,8 ppbv, representando as emissões antrópicas 5 % das emissões naturais (Granli e Bøckman, 1994). O potencial da molécula para absorver radiação de grande comprimento de onda é muito elevado. O seu efeito é considerado 150 (Powlson, 1993) a 250 (Mosier *et al.*, 1996) vezes superior ao da molécula de CO_2 . Segundo Powlson (1993), o seu contributo para o aquecimento global será da ordem dos 5 a 10 %.

O óxido hiponitroso parece estar também envolvido em reacções químicas na estratosfera, contribuindo para a depleção da camada de ozono. A destruição fotoquímica de N_2O origina outros óxidos de azoto que, por sua vez, são responsáveis pela destruição catalítica do O_3 , limitando a sua concentração na atmosfera (Bolin e Arrhenius, 1977; Newbould, 1989). O aumento dos óxidos de azoto pode contribuir para reduzir a níveis não

desejáveis a camada de O₃. Contudo, continua por quantificar o seu significado relativamente aos clorofluorcarbonetos (Newbould, 1989).

É preciso também ter sempre presente que, no ciclo biogeoquímico global, a desnitrificação, com formação de N₂, funciona como balanço da fixação biológica e industrial, descontaminando o planeta das formas oxidadas de azoto (Meek *et al.*, 1969). Contudo, do azoto que se liberta para a atmosfera, somente 5 a 20 % é N₂O, sendo o restante libertado na forma N₂ (Bolin e Arrhenius, 1977).

Para que a desnitrificação ocorra são considerados indispensáveis a presença de bactérias desnitrificantes, formas oxidadas de azoto, ausência de O₂ e a presença de dadores de electrões, como o C orgânico (Stevenson, 1986). Diversos outros factores ambientais, bem como a presença de plantas em crescimento, interferem com a taxa de desnitrificação e/ou com o tipo de gás formado. O tipo de gás produzido é importante na medida em que o N₂ é um gás inerte enquanto o N₂O tem importantes implicações em vários processos da atmosfera como foi sumariamente referido.

Diversos estudos têm demonstrado a ocorrência de perdas importantes de azoto por desnitrificação biológica quando os níveis de oxigénio se reduzem e existem nitratos no solo e outras condições favoráveis à desnitrificação (Meek *et al.*, 1969; Stefanson, 1972 a,b; Rolston *et al.*, 1978; Staley *et al.*, 1990; Buresh *et al.*, 1993; Smith e Chambers, 1993). A água em excesso é o principal factor que conduz à redução do O₂ disponível. Com teores de humidade abaixo de 60 a 70% da capacidade de campo, as perdas deixam de ter significado (Tisdale *et al.*, 1985). As mudanças de oxigenação provocadas pela rega favorecem a desnitrificação, porque, alternadamente, surgem condições favoráveis à formação de nitratos e à desnitrificação (Buresh *et al.* 1993). A proporção de N₂O formado também depende do arejamento. Em condições estritamente anaeróbias, o gás dominante é o N₂. À medida que o stress de O₂ se reduz, aumenta a proporção de N₂O (Boswell *et al.*, 1985).

A maior parte dos microrganismos desnitrificantes são heterotróficos, sendo o processo altamente dependente do carbono disponível. O carbono orgânico constitui-se como a principal fonte de electrões (Smith e Chambers, 1993; Breland, 1994 a). Stefanson (1972 a) verificaram que a desnitrificação esteve correlacionada com o carbono orgânico total do solo. Contudo, o carbono total parece não ser o factor mais importante. Stanford *et al.* (1975) obtiveram melhores correlações com o azoto nitrificado, utilizando uma fracção de azoto facilmente mineralizável (azoto extraível em 0,01 M CaCl₂). Rolston *et al.* (1978) verificaram que, em modalidades regadas e estrumadas, se perdeu 70% do azoto aplicado como

fertilizante, enquanto que com pouca água e sem estrume se perdeu apenas 1% do azoto aplicado.

As plantas interferem de várias formas com o processo de desnitrificação. Fornecem carbono, consomem oxigénio, competem pelo NO_3^- e absorvem água. Enquanto os dois primeiros efeitos contribuem para aumentar a desnitrificação, os dois últimos actuam em sentido contrário. Sobre o resultado final parece não haver consenso. Carter *et al.* (1967) registaram uma diminuição das perdas de azoto pela presença de plantas, enquanto Volz *et al.* (1976), Stefanson (1972 a) e Rolston *et al.* (1978) consideram haver um aumento das perdas na presença de plantas. Por outro lado, na presença de plantas, a proporção de N_2 parece aumentar (Stefanson, 1972 a).

A medição da desnitrificação em campo apresenta grandes dificuldades. O principal obstáculo é a impossibilidade de medir a desnitrificação total, dada a abundância natural de N_2 na atmosfera e a proporção variável de $\text{N}_2/\text{N}_2\text{O}$ que se forma (Powlson, 1993). A elevada solubilidade do N_2O em água é uma dificuldade adicional. A molécula pode entrar na solução do solo e, eventualmente, ser lixiviada ou, pelo contrário, pode ser volatilizada da solução para a atmosfera (Wild, 1988). A técnica dos isótopos radioactivos também tem sido questionada, dada a aparente discriminação na utilização pelos microrganismos do ^{15}N relativamente ao ^{14}N (Broadbent, 1980; Tisdale *et al.*, 1985) e às dificuldades de interpretação dos resultados devido à *pool substitution* (Wild, 1988). A técnica do acetileno, um inibidor da actividade biológica que evita a redução de N_2O a N_2 , permitindo, do ponto de vista teórico, avaliar a desnitrificação total, também não tem dado resultados satisfatórios (Holding, 1982; Goulding *et al.*, 1993).

2.1.4.2 – Desnitrificação não enzimática

Em solos bem arejados podem ocorrer perdas de azoto na forma gasosa devido a processos não enzimáticos de reacções que envolvem nitritos. Este fenómeno é conhecido por desnitrificação química ou quimiodesnitrificação (Stefanson, 1972 b; Nelson, 1982; Wild, 1988). Paul e Clark (1996) não concordam com o termo porque consideram que, se as perdas são devidas a processos químicos, a formação de NO_2^- é um processo biológico. Contudo, é sob esta designação que os autores expõem o tema.

Os principais mecanismos envolvidos incluem reacções químicas diversas do NO_2^- com a matéria orgânica e com os minerais de argila, autodecomposição do ácido nítrico e reacções catalíticas do NO_2^- com metais de transição reduzidos (Stevenson *et al.*, 1970; Nelson, 1982).

A importância agronómica das perdas de azoto por este processo é duvidosa, porque as condições que promovem a acumulação de NO_2^- , designadamente valores de pH elevados, restringem a formação de gases azotados. Contudo, em situações particulares, por exemplo de aplicação de ureia, podem criar-se condições para, momentaneamente, se formar NO_2^- e se iniciar o processo de quimiodesnitrificação. Os nitritos surgem próximos dos grânulos de ureia devido à elevação do pH e ao efeito supressivo dos sais amoniacais na *Nitrobacter*. Como o NO_2^- tem um coeficiente de difusão superior ao NH_3 , ao afastar-se dos locais onde se formou encontra pH mais baixo, condição indispensável para se iniciar uma série de reacções que originam a formação de gases azotados (Nelson, 1982; Boswell *et al.*, 1985; Stevenson, 1986; Tisdale *et al.*, 1985). Contudo, nem todo o NO_2^- formado evolui para formas gasosas. Boswell *et al.* (1985) consideram que parte é oxidado a NO_3^- e que algum NO_2^- reage com a matéria orgânica, ficando em combinações químicas que o tornam pouco disponível. Por tudo isto, Boswell *et al.* (1985) consideram que as quantidades de azoto que saem por este processo são muito incertas.

2.1.4.3 – Volatilização de amoníaco

A volatilização de NH_3 é um processo complexo que pode envolver reacções químicas no solo, processos físicos de transporte para fora do solo e interacções biológicas (Boswell *et al.*, 1985). A quantidade de NH_3 perdido é influenciado por uma série de factores agro-pedoclimáticos não permitindo, a interacção entre eles, uma interpretação clara dos efeitos individuais (Sousa *et al.*, 1999). Contudo, alguns dos factores mais decisivos estão identificados desde Allison (1955, 1966), destacando-se a forma de azoto aplicada, a reacção do solo, a capacidade de troca catiónica e algumas técnicas de aplicação.

A preocupação com a volatilização de amoníaco tem aumentado também por razões ambientais. Hutchinson e Viets (1969) realçam o contributo da deposição de NH_3 atmosférico para a eutrofização dos lagos do Nordeste do Colorado. Por outro lado, o NH_3 na atmosfera é um gás muito reactivo. A sua concentração a níveis elevados leva à formação de aerossóis complexos de sulfato e nitrato de amónio (Lemon e Houtte, 1980). As deposições húmidas destes compostos contribuem para a acidificação dos solos e, indirectamente, das águas. Em consequência directa, aumenta o alumínio disponível que é tóxico para as plantas e para os peixes (Newbould, 1989).

A volatilização de amoníaco é um processo que pode ocorrer em extensão apreciável em poucas horas após a aplicação dos fertilizantes, quando estão reunidas condições

favoráveis. Alguns dos factores determinantes são a aplicação superficial das formas amoniacais ou outras que levem ao aparecimento daquelas (como estrumes, chorumes e ureia), sobretudo a solos de pH elevado. A reacção do solo é importante, na medida em que condiciona a protólise do NH_4^+ . A percentagem de NH_3 não ionizado é de 0,1, 1,0, 10,0 e 50,0, respectivamente a pH 6,0, 7,0, 8,0 e 9,0 (Schmidt, 1982). Diversos investigadores têm demonstrado a importância da volatilização de amoníaco quando se conjugam aplicações superficiais de formas amoniacais a solos de reacção alcalina (Overrein e Moe, 1967; Fenn e Kissel, 1976; Hargrove *et al.*, 1977; Rachhpal-Singh e Nye, 1986a,b, 1988; Katyal *et al.*, 1987; Amberger, 1993), mas todos concordam que a incorporação imediata do fertilizante após a sua aplicação conduz a perdas insignificantes, desde que o solo tenha humidade adequada. Smith e Chambers (1993) verificaram que as aplicações superficiais de chorumes originaram perdas muito rápidas, sendo 40 a 50 % do NH_3 perdido nas primeiras seis horas, 74 % nas vinte e quatro horas seguintes e 90 % nos 5 dias após a aplicação. Trindade (1997) obteve resultados semelhantes. O autor registou perdas de 1,6 a 48,4 % do azoto aplicado, tendo 50 a 82 % das emissões de amoníaco ocorrido nas primeiras dez horas a seguir à aplicação.

Outros factores, como a quantidade de azoto aplicado (Overrein e Moe, 1967), a temperatura do solo (Clay *et al.*, 1990), a capacidade de troca cationica (Fenn e Kissel, 1976; Avnimelech e Laher, 1977; Sousa *et al.*, 1999) e o teor de carbonatos no solo (Avnimelech e Laher, 1977), influenciam a quantidade de NH_3 perdido e deverão ser tidos em conta nas estratégias de fertilização.

O aumento da importância da ureia como adubo azotado levou a investigação recente a destacar o papel dos inibidores da urease para controlar as perdas por volatilização de NH_3 . Os inibidores da urease retardam a hidrólise da ureia, condicionando a concentração das formas amoniacais no solo. Katyal *et al.* (1987) utilizaram o fenilfosforodiamidato com este objectivo e Clay *et al.* (1990) utilizaram o N-(n-butil)tiofosfórico triamida. Em ambos os estudos, reduziram-se substancialmente as perdas relativamente às modalidades testemunha. Katyal *et al.* (1987) destacaram também a importância de se efectuar uma rega após a aplicação de ureia em cobertura. Num solo calcário, os autores registaram uma redução nas perdas de azoto de 46 para 16 %.

A volatilização de amoníaco representa a maior proporção de perdas nos sistemas agropecuários (Powlson, 1993). A legislação sobre contaminação ambiental tem incidido muito sobre este aspecto. As perdas estão normalmente associadas ao manuseamento de estrumes e

chorumes e à reduzida eficiência de utilização do azoto dos fertilizantes orgânicos pelas plantas.

Na cultura do arroz, a volatilização de NH_3 é também o principal processo de perdas de azoto, dada a aplicação exclusiva de formas amoniacais e à insignificância da nitrificação (Holding, 1982; Powlson, 1993).

2.1.4.4 – Lixiviação

Por lixiviação de azoto entende-se o movimento do nutriente nas águas de percolação para as camadas profundas e, posteriormente, para os aquíferos subterrâneos e cursos de água. A saída de azoto por este processo é normalmente entendida como sinónimo de lixiviação de nitratos, por ser esta a principal forma perdida. Como já foi referido (2.1.3.1), os nitratos, sendo solúveis em água e não existindo nenhum mecanismo químico que os retenha no solo, ficam muito susceptíveis de ser lixiviados. O ião NH_4^+ , dada a sua natureza catiónica, pode ser adsorvido no complexo de troca, ficando restringida a sua presença na solução do solo. Apenas em solos arenosos, de reduzida capacidade de troca catiónica, se podem admitir perdas apreciáveis desta forma de azoto por lixiviação. As formas orgânicas de azoto, ao contrário das formas minerais, estão protegidas da lixiviação pela sua reduzida solubilidade em água. Contudo, Holding (1982) considera que a lixiviação de azoto orgânico e a sua acumulação nos aquíferos é preocupante e não tem recebido a atenção devida.

A presença de nitratos de origem agrícola nas águas é dos mais importantes problemas ambientais actuais com ligação ao sector agrícola. Por todo o mundo surge legislação no sentido de serem tomadas medidas que possam diminuir a concentração de nitratos na água de consumo doméstico. Na Europa, a concentração máxima admissível é de $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ (Decreto-lei nº 235/97). Embora exista a polémica se há razões médicas para o estabelecimento destes limites, dada a grande quantidade de nitratos de outras fontes que entram na dieta humana, parece não haver dúvidas que os nitratos em excesso podem ser prejudiciais à saúde. A ingestão de quantidades elevadas de nitratos pode dar origem a uma doença infantil designada metemoglobinémia. Os nitratos por si não são tóxicos. Contudo, algumas bactérias que contaminam a água e os alimentos podem reduzi-los a nitritos. Os nitritos reagem com o ferro/ferroso da desoxi-hemoglobina formando mete-hemoglobina com ferro/férrico. Nestas circunstâncias, o sangue é incapaz de transportar oxigénio (Wilson, 1949; Maynard e Barker, 1972; Magee, 1977; ATSDR, 1991). Esta doença é particularmente importante em bebés com menos de 4 meses, já que o pH do seu estômago é menos ácido e

permite o desenvolvimento das bactérias que reduzem os nitratos (ATSDR, 1991). Por outro lado, as aminas e os nitritos podem levar à formação de compostos N-nitroso. Estes compostos suspeita-se poderem ser cancerígenos, havendo alguma evidência médica de estarem associados ao cancro gástrico (Magge, 1977; Bolin e Arrhenius, 1977; Newbould, 1989).

Maynard e Barker (1972) definiram dietas críticas de ingestão de água e vegetais para bebés e adultos, atendendo às quantidades normalmente ingeridas e aos seus teores médios em nitratos. Concluíram que a margem de segurança é grande para os adultos e muito estreita para os bebés. Estudos anteriores tinham procurado identificar vegetais particularmente perigosos e isolado as condições ambientais que promovem a acumulação de nitratos (Wilson, 1949; Brown e Smith, 1966).

Os ruminantes são particularmente sensíveis à ingestão de nitratos. Os microrganismos do rúmen reduzem o azoto nítrico a nitroso e, posteriormente, a amoníaco. Contudo, o primeiro processo é mais rápido e os nitritos podem ser absorvidos. Atendendo à importância do problema, Brown e Smith (1966) e Westcott *et al.* (1998) conduziram estudos no sentido de definirem níveis críticos de nitratos em forragens para animais.

A redução dos níveis de nitratos nas águas é também importante dado o seu contributo para a eutrofização de cursos de água e lagoas. O enriquecimento das águas superficiais com nitratos (e fosfatos) permite o desenvolvimento anormal das algas e outras espécies aquáticas. A posterior decomposição deste material origina a desoxigenação das águas, com prejuízos nos equilíbrios biológicos e levando à morte de peixes (Viets, 1971; Bolin e Arrhenius, 1977; Newbould, 1989).

A importância agronómica da lixiviação tem sido evidenciada em diversos estudos pela elevada percentagem de azoto que sai do sistema (Herron *et al.*, 1971; Oertli, 1975; Pratt *et al.*, 1976 c; Bauder e Montgomery, 1980; Barraclough *et al.*, 1983; Saffigna *et al.*, 1977; Walters e Malzer, 1990 b; Trindade, 1997). Grande parte da informação disponível sobre lixiviação centra-se nas técnicas que permitem diminuir as perdas, como a adequação (redução) da dose de azoto às necessidades das culturas, o fraccionamento das aplicações, o uso de adubos de libertação gradual de nutrientes e a introdução de culturas intercalares de Outono/Inverno. Este assunto será retomado em 2.1.5.1 e 2.1.5.3.

A origem dos nitratos nas águas não reside, necessariamente, nos fertilizantes de síntese. A mineralização da matéria orgânica do solo, dos resíduos das culturas e dos fertilizantes orgânicos fornece grande parte dos nitratos lixiviados, devido à falta de sincronização da disponibilidade deste azoto com as necessidades das culturas (Pratt *et al.*,

1976 a; Goffart e Guiot, 1993; Powlson, 1993). O azoto mineralizado no fim do Verão e Outono é posteriormente lixiviado, com o excesso de água do período Outono/Inverno.

Algumas das principais técnicas utilizadas para avaliar a lixiviação incluem o uso de lisímetros (Jones *et al.*, 1977; Fraser *et al.*, 1994), a amostragem do lixiviado em cápsulas de cerâmica (Alberts *et al.*, 1977; Montgomery *et al.*, 1987; Djurhuus e Jacobson, 1995; Hansen e Djurhuus, 1996; Trindade, 1997), a determinação da concentração de nitratos em amostras de terras colhidas em profundidade (Nightingale, 1972; Pratt *et al.*, 1976 c; Rible *et al.*, 1976) e a monitorização do teor de nitratos em sistemas de drenagem dos solos (Commoner, 1977).

2.1.4.5 – Erosão

Por erosão entende-se a perda de solo, normalmente das camadas superficiais, motivada pela força motriz da água de escoamento superficial e/ou do vento. No primeiro caso designa-se erosão hídrica e no segundo erosão eólica. As perdas de azoto podem ser importantes na medida em que são erodidas as camadas superficiais, mais ricas em azoto. Dada a sua representatividade, o azoto é perdido sobretudo na forma orgânica (Stevenson, 1986).

A erosão é um processo selectivo em que a fracção erodida pode conter mais azoto que o solo que fica. Segundo Paul e Clark (1996) quando ocorre erosão hídrica, devido à solubilidade dos nitratos, o ião NO_3^- entra facilmente nas águas de escoamento superficial, sendo perdido de forma mais que proporcional aos restantes constituintes do solo. Também na erosão eólica as partículas finas são mais facilmente levantadas pelo vento que as mais grosseiras. Os períodos de seca que antecedem momentos de erosão eólica ou hídrica contribuem para o aumento das perdas, na medida em que o NO_3^- tende a ser conduzido para as camadas superficiais pelo movimento ascendente da água que se evapora.

A erosão é normalmente encarada como um fenómeno negativo do ponto de vista agronómico e ambiental, e constitui motivo de grande preocupação em vastas zonas do globo, devido ao impacte negativo na fertilidade dos solos. Contudo, as terras baixas de alagamento periódico devem a sua fertilidade ao contínuo enriquecimento com os materiais vindos de locais a montante. Os *loess*, por exemplo, são solos enriquecidos pela deposição dos materiais trazidos pelo vento de outros locais.

2.1.4.6 – Perdas pela canópia

A quantidade de azoto acumulado nas plantas aumenta durante o desenvolvimento vegetativo. Após a floração, durante a maturação e senescência, o azoto total nas plantas

diminui, devido à perda de formas voláteis de azoto, sobretudo NH_3 (Hooker *et al.*, 1980; Wetselaar e Farquhar, 1980; Holding, 1982; Palta e Fillery, 1993). Alguns autores consideram que o fenómeno se acentua com a aplicação de doses elevadas de azoto (Holding, 1982; Powlson, 1993) ou quando as plantas se apresentam com doenças (Goulding *et al.*, 1993). Contrariamente, Palta e Fillery (1993) verificaram que o aumento da dose de azoto em trigo reduziu as perdas pela canópia. Estes autores referem que o factor determinante foi a duração do processo de senescência. As plantas de trigo muito fertilizadas desenvolveram maior área foliar e, conseqüentemente, sofreram mais intensamente o stress hídrico de final de ciclo, encurtando-se o processo de senescência.

As perdas de azoto em formas voláteis não estão, necessariamente, associadas ao processo de senescência. Stutte *et al.* (1979) estimaram que a soja perdeu durante o ciclo vegetativo 45 kg N ha^{-1} . Segundo aqueles autores, as perdas foram mais importantes nas fases iniciais do ciclo e proporcionais à temperatura e taxa de transpiração.

O azoto pode ainda ser perdido na forma de NO (Rockel *et al.*, 1996). No entanto, e segundo estes autores, o fenómeno não tem, quantitativamente, significado para as plantas (menos de 0,1 % do azoto absorvido). Contudo, pode ser importante para a sua presença na atmosfera.

Diversos elementos nutrientes podem ser removidos da parte aérea da planta devido à acção da chuva, rega, orvalho e nevoeiro. Este fenómeno é designado de lixiviação e é muito importante para o potássio (Wetselaar e Farquhar, 1980) e também para o azoto (Tukey *et al.*, 1958; Bhan *et al.*, 1959). O fenómeno tem maior significado ecológico durante a senescência. Nesta fase, a permeabilidade das biomembranas aumenta, contribuindo para o aumento da concentração de solutos orgânicos e inorgânicos no apoplasto dos tecidos das folhas (Wetselaar e Farquhar, 1980). Assim, a lixiviação aumenta com a idade dos tecidos (Tukey *et al.*, 1958, Wetselaar e Farquhar, 1980).

A importância agronómica das perdas de azoto pela canópia, volatilizado ou lixiviado, é ainda controversa. Powlson (1993) considera que, em plantas com um desenvolvimento normal, as perdas envolvidas são inferiores a 10 % do azoto acumulado à floração. Na cultura do trigo, Palta e Fillery (1993) registaram, durante o processo de senescência das plantas, a volatilização de 6 a 19 % do azoto acumulado à floração. Em florestas tropicais, as perdas anuais de azoto por lixiviação são da ordem dos 12 a 60 kg N ha^{-1} (Marschner, 1986). Wetselaar e Farquhar (1980) consideram que ignorar o fenómeno tem originado sobrestimativas das perdas de azoto do solo por desnitrificação, lixiviação e volatilização.

2.1.4.7 – Perdas de azoto durante a nitrificação

Bremner e Blackmer (1978) demonstraram que se pode perder N_2O durante a oxidação biológica do NH_4^+ a NO_3^- em condições aeróbias. Os autores sugerem que a utilização da nitropiridina (2-cloro-6-triclorometilpiridina), um inibidor da nitrificação, pode limitar as perdas por este processo. Vos *et al.* (1994) verificaram que, durante a decomposição de material vegetal, aumentava a volatilização de NO. Contudo, verificaram que o NO libertado não estava correlacionado com o NO_3^- no solo, mas sim com o NH_4^+ . Os autores atribuíram a responsabilidade principal à nitrificação, pelo aumento significativo das perdas de NO registadas.

Embora as quantidades de azoto perdidas por este processo estejam ainda por quantificar (Jarvis *et al.*, 1994), o fenómeno pode ter alguma importância dada a implicação dos óxidos formados no efeito de estufa e no equilíbrio da camada de ozono (Bremner e Blackmer, 1978, Granli e Bøckman, 1994).

2.1.4.8 – Azoto exportado pelas plantas

As plantas absorvem, em média, mais azoto que qualquer outro nutriente. Deste modo, grande parte desse azoto sai do sistema à colheita. Esta deveria ser a única via possível de saída do nutriente, mas em muitas situações nem sequer é a mais importante, dada a ineficiência com que as plantas utilizam o azoto aplicado. Contudo, não é necessariamente importante aumentar o azoto exportado. Diminuir as perdas e, simultaneamente, o azoto aplicado, são as vias mais racionais de equacionar o problema, isto é, aumentar a eficiência, mantendo a exportação.

2.1.5 – Eficiência da fertilização azotada

Por eficiência de utilização do azoto (EUN) entende-se a percentagem de nutriente aplicado como fertilizante que é recuperado pelas plantas. Em culturas arvenses, a EUN pode variar numa gama ampla de valores da ordem dos 30 a 80 %, dependendo da quantidade e formas de azoto aplicadas e de factores edáficos, climáticos e culturais (Shaviv, 1993). A eficiência de utilização de azoto pelas plantas é normalmente baixa devido, sobretudo, a perdas por lixiviação e em formas gasosas. A imobilização biológica e a retenção de NH_4^+ nos

minerais de argila podem, também, contribuir para a redução da EUN. O azoto fica indisponível quando as plantas mais necessitam dele e a sua posterior libertação nem sempre ocorre no momento mais oportuno (Shaviv, 1993). A reduzida eficiência de utilização do azoto dos fertilizantes pelas plantas é hoje motivo de grande preocupação, não tanto por questões técnicas/económicas, relacionadas com a produtividade/rentabilidade das culturas, mas sim por questões ambientais.

A percentagem de azoto recuperado pode ser determinada pela diferença entre o azoto recuperado nas modalidades fertilizadas e na modalidade testemunha. Esta forma de cálculo é conhecida por método convencional ou das diferenças (Parr, 1973; Pomares-Garcia e Pratt, 1978 a; Rao *et al.*, 1991). Por este método assume-se que o contributo do solo na nutrição azotada das plantas é idêntico nas modalidades fertilizadas e na modalidade testemunha (Pomares-Garcia e Pratt, 1978 a). Como não é possível distinguir se o azoto absorvido teve origem no solo ou no fertilizante, alguns autores sugerem que o resultado deste processo de cálculo tenha a designação de *azoto aparentemente recuperado* (Harmsen e Moraghan, 1988; Schnier, 1994).

Outra forma de determinar a EUN recorre ao uso de isótopos radioactivos. Normalmente utilizam-se fertilizantes enriquecidos com ^{15}N e, posteriormente, determina-se que fracção de isótopo foi recuperada pelas plantas. A expressão utilizada é a seguinte (Wild, 1988)

$$\frac{(\% \text{ at. } ^{15}\text{N}_1 - \% \text{ at. } ^{15}\text{N}_0) \cdot N_t}{(\% \text{ at. } ^{15}\text{N}_f - \% ^{15}\text{N}_0) \cdot F} \times 100 ,$$

em que: % at. $^{15}\text{N}_1$, % at. $^{15}\text{N}_0$ e % at. $^{15}\text{N}_f$ representam, respectivamente, a percentagem de átomos ^{15}N nas plantas fertilizadas, não fertilizadas e no fertilizante marcado e N_t e F representam o azoto total nas plantas e no fertilizante, respectivamente.

Pelo método das diferenças obtêm-se sobrestimativas do azoto do fertilizante que é recuperado pelas plantas, porque parte do nutriente absorvido teve origem no solo e não no fertilizante (Pomares-Garcia e Pratt, 1978 a; Rao *et al.*, 1991). Pelo contrário, o método do isótopo tende a subestimar o contributo do fertilizante para a nutrição das plantas, porque as trocas de azoto entre as suas diferentes fracções no solo limitam a recuperação de azoto marcado (Harmsen e Moraghan, 1988; Rao *et al.*, 1991; Schnier, 1994).

A diferença entre os resultados das duas formas de cálculo aumenta em solos de elevada actividade biológica, nos quais as trocas de azoto entre as diferentes fracções no solo é significativa (Carter *et al.*, 1967; Olson, 1980; Hart *et al.*, 1986). Contudo, apesar das

diferenças quantitativas, os resultados dos dois métodos estão, normalmente, bem correlacionados (Carter *et al.*, 1967; Tyler *et al.*, 1983; Rao *et al.*, 1991).

O efeito *priming* ou ANI, definido em 2.1.2.2.5, também pode interferir com os resultados obtidos pelos dois processos (Rao *et al.*, 1991; Schnier, 1994). A sua ocorrência aumenta as diferenças entre as estimativas dos dois métodos, na medida em que mais azoto do solo é absorvido pelas plantas nas modalidades fertilizadas.

De acordo com Jansson e Persson (1982), o método das diferenças fornece resultados de maior sentido prático, na medida em que avalia o efeito final da fertilização na nutrição azotada das plantas.

2.1.5.1- Efeito das técnicas culturais na percentagem de azoto recuperado

Nos últimos anos, o grande interesse dos investigadores por estas matérias prende-se com o facto de se admitir que os níveis de produção actuais podem ser mantidos com doses bem mais moderadas de azoto, se for promovida a eficiência de uso do nutriente pelas plantas. Esta ideia está expressa em diversos conceitos actuais como fertilização integrada e agricultura sustentável e foi desenvolvida no Código de Boas Práticas Agrícolas.

A eficiência de utilização do azoto depende da espécie. Em condições ecológicas e culturais idênticas, determinadas espécies recuperam mais azoto que outras. A batateira e a beterraba sacarina são culturas que, normalmente, recuperam uma reduzida percentagem do azoto que é aplicado. No extremo oposto estão as gramíneas forrageiras (Boswell *et al.*, 1985). Os diferentes genótipos dentro da mesma espécie também apresentam diferenças na forma como absorvem e utilizam o azoto aplicado. Assim, este aspecto deve ser um critério de selecção a ter em conta nos programas de melhoramento genético (Chevalier e Schrader, 1977; Kleinkopf *et al.*, 1981; De Datta e Broadbent, 1988; Kamoshita *et al.*, 1999).

A utilização de doses excessivas de azoto é dos factores que mais contribui para a baixa eficiência da fertilização azotada. Os decréscimos na percentagem de azoto recuperado são, sobretudo, acentuados quando se excede a dose técnica óptima (Tyler *et al.*, 1983).

A aplicação do azoto em duas ou mais fracções durante a estação de crescimento permite, em determinadas condições, obter a mesma produção com menos azoto, devido à melhor sincronização da disponibilidade do nutriente com as necessidades das plantas. As vantagens do fraccionamento são normalmente evidentes em condições que potenciem as perdas, como, por exemplo, solos arenosos e climas de elevada precipitação. Os estudos de

Girardin *et al.* (1993) na cultura do milho produziram os resultados clássicos que é comum encontrar neste género de experiências. Os autores compararam a fertilização convencional (220 kg N ha^{-1}), em que todo o azoto é aplicado de uma só vez, com a mesma dose e uma dose inferior (170 kg N ha^{-1}) aplicadas em cinco fracções diferentes através de fertirrigação. O fraccionamento, para a mesma dose (220 kg N ha^{-1}), originou mais azoto residual, na medida em que diminuíram as perdas, tendo a produção sido idêntica. Quando se comparou a aplicação de 220 kg N ha^{-1} de uma só vez com a aplicação fraccionada de 170 kg N ha^{-1} , a produção foi idêntica. Em resumo, a percentagem de azoto recuperado aumentou e as perdas de azoto diminuíram com o fraccionamento. Em muitos outros estudos, com diferentes culturas e em condições ecológicas variadas, foram encontradas vantagens no fraccionamento (Herron *et al.*, 1971; Hamid, 1972; Jung *et al.*, 1972; Miller *et al.*, 1975; Stark *et al.*, 1983).

As formas de azoto que são aplicadas como fertilizante podem dar origem a percentagens de recuperação diferentes. O resultado depende, sobretudo, do tipo de perda de azoto predominante em cada situação. Jung *et al.* (1972) e Bundy *et al.* (1986) verificaram que em solos arenosos, onde as perdas ocorrem sobretudo por lixiviação, as formas amoniacais foram mais eficientes que as formas nítricas. Na cultura do trigo, Recous *et al.* (1988) registaram maior eficiência na utilização de azoto nítrico relativamente às formas amoniacais e ureia. Atribuíram o resultado à existência de condições favoráveis à volatilização de amoníaco, à melhor mobilidade dos nitratos no solo e à imobilização preferencial do NH_4^+ pelos microrganismos. A percentagem de azoto recuperado dos fertilizantes orgânicos é normalmente baixa em culturas anuais, de estação de crescimento curta (Grignani e Acutis, 1994; Rodrigues e Coutinho, 1996, 1998; Rodrigues *et al.*, 1999). A razão prende-se com a reduzida fracção de azoto do fertilizante que se mineraliza durante o ciclo.

Os adubos de libertação lenta foram desenvolvidos para melhorar a eficiência de uso dos nutrientes. Aqueles cujo mecanismo de acção assenta no controlo da actividade microbiana têm sido os mais investigados. Em diversos estudos, em condicionalismos de elevadas perdas potenciais por lixiviação, a nitropiridina, um inibidor da nitrificação, permitiu aumentar a percentagem de azoto recuperado (Prasad, 1976; Chancy e Kamprath, 1987; Walters e Malzer, 1990 a). Outras substâncias, designadamente inibidores da hidrólise da ureia, também permitiram, em condicionalismos especiais, aumentar a percentagem de azoto recuperado (Shoji *et al.*, 1991; Pavlíková *et al.*, 1994).

2.1.5.2 – Eficiência fisiológica

Alguns autores têm procurado complementar a informação sobre a eficiência de uso do azoto determinando índices fisiológicos (Suzuki e MacLeod, 1977; Tyler *et al.*, 1993; Cassman *et al.*, 1993; Isfan, 1993; Aufhammer e Ehmele, 1994; Costa e Giovanardi, 1994; Fotyma *et al.*, 1994; Mambeli e Grandi, 1994; Rodrigues e Coutinho, 1996). O índice mais utilizado, designado de eficiência interna ou fisiológica, mede o aumento da produção por unidade de azoto absorvido. Os índices de eficiência fisiológica também estão dependentes de aspectos genéticos, podendo ser usados, por exemplo, para comparar híbridos (Isfan, 1993), e de factores culturais, como a época de aplicação dos nutrientes (Suzuki e MacLeod, 1977).

A utilidade destes índices pode ser demonstrada pelo consumo de luxo. A absorção de quantidades excessivas de azoto pelas plantas é interpretada como um aspecto positivo, quando avaliada pela percentagem de azoto recuperado. Contudo, a determinação de índices fisiológicos detecta a redução de eficiência associada ao consumo de luxo (Lauer, 1985).

2.1.5.3 – Eficiência dos sistemas culturais

Os investigadores têm dado cada vez maior importância à eficiência dos sistemas culturais na recuperação de azoto. Nesta perspectiva, a estratégia de gestão do azoto não é delineada ao nível da estação de crescimento, mas sim para ano inteiro ou mesmo para a totalidade da rotação.

A introdução de culturas Outono/Inverno entre duas culturas principais é a técnica a que tem sido dedicada maior atenção. Estas culturas, designadas na língua anglo-saxónica de *catch crops*, são semeadas imediatamente após a colheita da cultura principal e enterradas no solo logo no fim do Outono ou então na Primavera seguinte, imediatamente antes da instalação da próxima cultura principal. Têm como objectivo recuperar o azoto inorgânico residual que resulta da cultura anterior e aquele que se mineraliza no período subsequente.

Esta técnica tem sido muito estudada no Centro e Norte da Europa. Em Portugal, nenhum conceito agronómico tradicional traduz exactamente o sentido de *catch crop*. Os que mais se aproximam são os de cultura intercalar e sideração. Contudo, os objectivos da sua inserção na rotação não são os mesmos. Ao conceito de cultura intercalar está subjacente uma dada utilização na exploração. Normalmente destina-se à alimentação animal. As siderações, normalmente com leguminosas, são feitas para melhorar o balanço do azoto e do carbono no solo e desta forma promover o desenvolvimento da cultura seguinte. *Catch crop* é um

conceito que surge exclusivamente associado a preocupações ambientais e em que toda a biomassa formada é enterrada. Neste trabalho será usado o termo intercalar para designar culturas de Outono/Inverno que, independentemente do seu destino na exploração, podem diminuir as perdas de azoto durante o Inverno.

O efeito favorável da inclusão de culturas intercalares na rotação, na redução do potencial de lixiviação, tem sido evidenciado em diversos estudos por toda a Europa (Olsen *et al.*, 1970; Martinez e Guiraud, 1990; Jensen, 1992; Thomsen, 1993; Chapot, 1994; Convertini *et al.*, 1994; Ferri *et al.*, 1994 a; Lewan, 1994; Svensson *et al.*, 1994; van Dam, 1994; Vos e Putten, 1994; Harrison *et al.*, 1996; Sarno *et al.*, 1996; Struik e Bonciarelli, 1996; Allison *et al.*, 1998). As plantas absorvem azoto inorgânico e reduzem o excesso de água durante o período húmido. Contudo, Francis *et al.* (1998) consideram que o segundo efeito é pouco importante, pois verificaram que estas culturas não reduziram significativamente a água de drenagem durante o Inverno.

A lista de culturas ensaiada é extensa, incluindo diversas gramíneas (centeio, cevada, aveia, trigo e azevém), crucíferas (colza, nabos, mustardas e couves e rabanos forrageiros) e leguminosas (ervilhacas, trevos e tremocilhas). A característica mais desejável nestas culturas é a tolerância ao frio, permitindo taxas de crescimento positivas durante o Inverno. No Reino Unido, após investigação de três anos e em sete locais diferentes, Harrison *et al.* (1996) elegeram o centeio como melhor cultura intercalar. Em França, em situações de elevada disponibilidade de azoto, Chapot e Robin (1994) obtiveram melhores resultados com as crucíferas. Na Holanda, Vos e Putten (1994) registaram também um melhor comportamento das crucíferas. A colza [*Brassica napus* subsp. *Oleifera* (Metz) sinsk.] apresentou vantagens relativamente ao centeio. Enquanto a gramínea apenas acumulou biomassa no Outono, a crucífera apresentou sempre algum desenvolvimento durante o Inverno, mesmo nos meses mais frios.

A escolha da intercalar deve ter em conta a técnica cultural utilizada. Alguns autores propõem o enterramento das plantas no Outono (Jensen, 1992; Sorensen e Thorup-Kristensen, 1993). Jensen (1992) verificou que a mostarda (2,6 % N) é um cultura desapropriada para enterrar no Outono, devido às elevadas taxas de decomposição que sofre logo após o enterramento. O azevém (1,4 % N) teve um comportamento mais aceitável. Quando o objectivo é enterrar próximo da cultura seguinte, outras espécies poderão ser mais interessantes. Martinez e Guiraud (1990) verificaram que o enterramento do azevém imediatamente antes da sementeira do milho originou um diminuição do azoto absorvido de

224 para 180 kg ha⁻¹. O estabelecimento do milho também foi prejudicado pela intercalar. Conseqüentemente, foi originado um decréscimo de 13 % na produção.

Os efeitos de longo prazo da introdução de culturas intercalares não estão suficientemente esclarecidos (Powlson, 1993; Lewan, 1994; Vos *et al.*, 1994; Aronsson e Torstensson, 1998). O enterramento sistemático de plantas aumenta o potencial de mineralização do solo pelo aumento da matéria orgânica e diminuição da sua razão C/N. A preocupação dos autores prende-se com a eventualidade de nalguns anos não ser introduzida a cultura intercalar ou a sua instalação falhar, agravando-se os riscos de serem lixiviadas quantidades elevadas de azoto. A introdução do *set-aside* em terras de elevado potencial de mineralização pode também conduzir a aumentos substanciais de perdas de azoto por lixiviação (Dalbiés e Doré, 1994 a,b).

Com a utilização da parte aérea das culturas intercalares na alimentação animal ultrapassam-se alguns dos inconvenientes referidos. As culturas recuperam de igual forma o azoto residual, mas como não é incorporada muita biomassa, reduzem-se os riscos da acumulação da matéria orgânica em excesso e das interferências no desenvolvimento da cultura seguinte.

2.2 – Avaliação da disponibilidade de azoto no solo

O azoto que o solo disponibiliza para as plantas durante uma estação de crescimento difere de forma significativa de campo para campo, sendo, por consequência, muito variável a resposta aos fertilizantes. Com base em noventa e nove experiências de campo na Holanda com a cultura da batata, Neeteson e Wadman (1987) verificaram que a dose óptima de azoto pôde variar entre 0 e 400 kg ha⁻¹.

A principal dificuldade em estimar a dose adequada de azoto relaciona-se com a avaliação do contributo da mineralização da matéria orgânica do solo para a nutrição azotada das plantas. Assim, informação sobre a disponibilidade natural de azoto no solo é decisiva para se fazerem recomendações capazes, de modo a minimizar as saídas de azoto para o meio ambiente e a obter-se produções de maior qualidade (Rees *et al.*, 1996).

A necessidade de se desenvolverem métodos de avaliar a capacidade do solo em fornecer azoto surgiu com o aparecimento dos fertilizantes de síntese (Stanford, 1982). A procura de um índice laboratorial de disponibilidade de azoto acentuou-se a partir de 1940.

Contudo, a redução do preço dos fertilizantes diminuiu o interesse da sua utilização prática (Keeney, 1982). Nos países desenvolvidos, a razão entre o custo do azoto e o valor da produção tem sido de tal forma baixo que o óptimo económico praticamente coincide com o máximo físico. Segundo Mengel (1991), este facto é bem conhecido dos agricultores, os quais não são desencorajados, por esta via, a aplicar azoto em excesso. Contudo, a procura de um índice laboratorial capaz tem ganho renovado interesse por preocupações ambientais e da qualidade dos produtos agrícolas. A sua importância pode ser avaliada pela quantidade de revisões sobre o assunto nas últimas décadas. Algumas das mais importantes são de Harmsen e van Schreven (1955), Dahnke e Vasey (1973), Keeney (1982), Stanford (1982), Dahnke e Johnson (1990), Bundy e Meisinger (1994), Rice e Havlin (1994) e Jarvis *et al.* (1996).

Os métodos que permitem obter informação sobre a disponibilidade de azoto no solo podem ser divididos em quatro grupos principais: (i) ensaios biológicos com plantas; (ii) determinação do azoto inorgânico no solo; (iii) testes laboratoriais (biológicos e químicos) de avaliação da disponibilidade potencial de azoto assimilável no solo; e (iv) incubações *in situ*.

2.2.1 - Ensaio biológicos

A forma mais simples e directa de determinar a disponibilidade de um nutriente no solo é medir a resposta das plantas em ensaios de campo (Campbell, 1978; Marschner, 1986; Schepers e Meisinger, 1994). O parâmetro biológico mais utilizado é o azoto recuperado em modalidades não fertilizadas, garantindo condições experimentais que limitem as entradas e saídas de azoto do sistema (Delphin *et al.*, 1991; Schepers e Meisinger, 1994; Jarvis *et al.*, 1996; Szucs, 1996). Até ao presente, os ensaios biológicos constituem a mais extensa fonte de informação disponível sobre a capacidade dos solos em fornecer azoto para as culturas, já que existem ensaios de fertilização em praticamente todos os tipos de solos e sistemas culturais (Jarvis *et al.*, 1996).

A medição do azoto absorvido pelas plantas em campo é considerado o melhor indicador da capacidade do solo em fornecer azoto, já que tem em conta todos os factores que regulam a mineralização. No entanto, os ensaios biológicos são métodos demorados e laboriosos (Harmsen e van Schreven, 1955; Broadbent, 1981; Marschner, 1986). Por outro lado, fornecem informação retrospectiva e aplicável apenas a condições ambientais e culturais específicas, não sendo possível extrapolar a informação entre regiões (Marschner, 1986; Coutinho, 1989; Jarvis *et al.*, 1996). Szucs *et al.* (1996) consideram, também, que os ensaios

de campo geram subestimativas do azoto absorvido, por normalmente não se ter em conta o azoto retido nas raízes.

Os ensaios em estufas e em vasos são simplificações dos ensaios de campo, em que se consegue controlar melhor as condições externas. O valor dos resultados é comparável ao dos ensaios de campo, mas apresentam ainda mais limitações quando se pretende extrapolar informação, devido ao maior artificialismo das experiências (Harmsen e van Schreven, 1955).

Atendendo à importância reconhecida dos ensaios biológicos, os seus resultados são normalmente utilizados para calibrar métodos laboratoriais mais adequados aos procedimentos de rotina.

2.2.2 – Azoto inorgânico no solo

O azoto inorgânico no solo no início da estação de crescimento é o principal critério utilizado para avaliar a disponibilidade natural do nutriente para as plantas em regiões áridas e semiáridas, servindo de base para a recomendação de fertilização. Alguns autores sugerem que estas determinações também possam ser feitas durante a estação de crescimento, permitindo ajustar os fertilizantes aplicados às necessidades das plantas em adubações de cobertura.

2.2.2.1 – Avaliação do azoto inorgânico no início da estação de crescimento

A avaliação do azoto inorgânico no solo envolve a determinação dos iões NO_3^- e NH_4^+ ou apenas do ião NO_3^- . Pelo facto do ião nitrato ser aquele que se acumula na maioria dos solos agrícolas, por vezes não se determina o NH_4^+ (Carter *et al.*, 1974; Giles *et al.*, 1975; Reuss *et al.*, 1977; Roberts *et al.*, 1980). Contudo, em solos pouco arejados ou de reacção excessivamente ácida ou alcalina, pode acumular-se NH_4^+ (Dahnke e Vasey, 1973). Assim, a tendência actual é para se determinarem simultaneamente os dois iões (Mengel, 1985; Hong *et al.*, 1990; Appel e Mengel, 1992; Paul e Beauchamp, 1993).

O valor do azoto inorgânico presente no solo no início da estação de crescimento depende de factores ambientais e culturais. Quanto menor for o potencial de saídas de azoto do solo por lixiviação ou volatilização, maior pode ser o valor da sua determinação (Dahnke e Johnson, 1990). Os mesmos autores consideram, também, que o azoto inorgânico assume particular importância em estações de crescimento curtas e/ou ciclos culturais rápidos, em que o contributo da mineralização é menos importante. O valor do azoto inorgânico depende ainda

da razão C/N dos resíduos do precedente cultural. A presença de resíduos de elevada razão C/N vai conduzir à imobilização biológica do azoto mineral disponível, pelas razões já apresentadas em 2.1.2.1.

Stanford e Legg (1968) e Keeney (1982) atribuem ao azoto inorgânico do solo valor idêntico ao azoto dos fertilizantes de síntese, por ambos se poderem considerar de igual disponibilidade para as plantas. Na perspectiva anterior, está subjacente que o azoto inorgânico do solo tem apenas valor quantitativo. Contudo, Giles *et al.* (1975) e Roberts *et al.* (1980) consideram que os níveis de azoto inorgânico reflectem, também, a capacidade do solo em fornecer nutriente ao longo da estação de crescimento, assumindo, assim, um valor qualitativo. Diversos investigadores têm testado o valor do azoto inorgânico como indicador da disponibilidade de azoto no solo. As correlações com os resultados biológicos têm sido variáveis, desde satisfatórias (Giles *et al.*, 1975; Roberts *et al.*, 1980; Paul e Beauchamp, 1993) a moderadas (Hong *et al.*, 1990) ou inexistentes (Fox e Piekielek, 1978 a). Keeney e Bremner (1966) encontraram uma relação significativa entre o azoto mineral no solo e o azoto exportado pelo azevém apenas até ao primeiro corte. Este resultado parece reforçar a tese de que o azoto inorgânico terá, sobretudo, um valor quantitativo.

A utilização do azoto inorgânico nos sistemas de recomendação de fertilização apresenta algumas limitações relativas ao processo de amostragem. As variáveis críticas são: (i) a profundidade de colheita das amostras; (ii) o número de subamostras por campo; e (iii) a data de amostragem.

Devido à mobilidade dos nitratos, é necessário atingir profundidades abaixo das camadas mobilizadas. As profundidades que têm sido consideradas variam entre 60 e 180 cm. Em climas húmidos, culturas com sistemas radicais mais profundos e em solos sem camadas impeditivas ao desenvolvimento das raízes, recomendam-se as profundidades mais elevadas (Dahnke e Johnson, 1990). Contudo, Giles *et al.* (1975) demonstraram que utilizando apenas os 60 cm superficiais se conseguem correlações com a produção praticamente idênticas relativamente a amostras colhidas a maior profundidade. Segundo os autores, o aumento reduzido na precisão do diagnóstico, quando se utilizam maiores profundidades, não justifica o esforço adicional na colheita.

O número de subamostras por campo deve ser elevado devido à variabilidade espacial dos nitratos (Jarvis *et al.*, 1996). Contudo, parece não haver consenso entre investigadores sobre o número de subamostras considerado adequado. Por outro lado, Reuss *et al.* (1977) verificaram que os nitratos das diferentes subamostras não se apresentam segundo uma distribuição normal, sem antes lhe ser aplicada uma transformação logarítmica. Assim, a

média geométrica representa melhor o teor de nitratos no solo que a média aritmética. A análise de regressão mostrou que a média geométrica podia ser estimada multiplicando a média aritmética por 0,91. Os estudos posteriores de Meirvenne e Hofman (1989) confirmaram estes resultados.

A melhor data de amostragem é, frequentemente, considerada o momento mais próximo possível da sementeira (Campbell, 1978; Dahnke e Johnson, 1990). Contudo, Magdoff *et al.* (1984) são de opinião que, em climas áridos, a amostragem se pode fazer com bastante antecedência, e que em climas húmidos pode haver vantagem em recolher as amostras mesmo após a sementeira.

Após a colheita das amostras deve parar-se rapidamente a actividade biológica. Os processos possíveis envolvem a secagem ao ar numa fina camada de terra, o congelamento ou a utilização de inibidores biológicos, como o tolueno (Storrier, 1966). Storrier (1966) elegeu o congelamento como sendo o método mais adequado. Contudo, o mais prático e que exige menos meios é a secagem (Dahnke e Johnson, 1990).

2.2.2.2 – Avaliação do azoto inorgânico durante a estação de crescimento

Magdoff *et al.* (1984) propuseram a determinação dos níveis de NO_3^- nos 30 cm superiores do solo, quando o milho apresenta de 15 a 30 cm de altura (duas semanas antes da data corrente de cobertura) para prever as necessidades de azoto para a cultura. Os autores assumem que, naquela data, o NO_3^- no solo integra todos os factores edáficos e climáticos que influenciam a disponibilidade do nutriente. Esta época é crucial, porque corresponde ao início da fase mais activa de absorção das plantas.

Magdoff *et al.* (1984) obtiveram uma correlação elevada entre o NO_3^- no solo e a produção de forragem. Verificaram que, para valores inferiores a $36 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$, havia uma elevada probabilidade da cultura responder à aplicação de azoto em cobertura. O método ficou conhecido como *presidedress nitrate test* (PSNT) e a sua versão original é normalmente atribuída a Magdoff *et al.* (1984). Contudo, já no início dos anos setenta, Doll *et al.* (1971) tinham definido níveis críticos para o teor de nitratos no solo em determinadas fases do ciclo do milho.

O teste foi entretanto aplicado por outros investigadores. As correlações com a produção de milho têm sido sempre bastante satisfatórias (Hong *et al.*, 1990; Meisinger *et al.*, 1992; Sims *et al.*, 1995; Heckman *et al.*, 1996; Warncke, 1996). Alguns autores incluíram também a determinação do NH_4^+ . Meisinger *et al.* (1992) obtiveram uma melhoria na relação

entre o azoto mineral e a produção, comparativamente com o uso isolado do NO_3^- . Por outro lado, Sims *et al.* (1995) não registaram melhorias no grau de precisão quando incluíram o NH_4^+ na correlação, bem como quando aumentaram a profundidade de colheita das amostras.

2.2.3 – Índices laboratoriais de disponibilidade de azoto

Os métodos laboratoriais de determinar a disponibilidade de azoto no solo podem ser divididos em biológicos e químicos. Os índices biológicos envolvem a incubação dos solos em condições controladas durante períodos de tempo variáveis. Os índices químicos obtêm-se por processos extractivos, utilizando reagentes de natureza e concentração variada, bem como condições físicas de extracção diversas.

Os valores obtidos são medidas indirectas do azoto disponível, necessitando, por isso, de ser calibrados. A calibração é, normalmente, feita com resultados de ensaios biológicos. Por vezes, os resultados dos testes químicos são sujeitos, numa primeira fase, a uma triagem através de correlações com os resultados das incubações biológicas. Contudo, na sua fase final, os resultados deverão sempre ser comparados com resultados obtidos em campo. Hanway (1973) discute os factores a ter em conta para conduzir validamente uma experiência de calibração.

2.2.3.1 – Incubações biológicas

Com as incubações biológicas pretende-se extrair, da matéria orgânica, o azoto facilmente oxidável, utilizando o mesmo tipo de agentes microbiológicos que actuam nas condições de campo (Harmsen e van Schreven, 1955; Broadbent, 1981). Envolve incubações de solo em condições aeróbias ou anaeróbias por períodos de tempo que podem ir de poucos dias a mais de quarenta semanas. As variantes ensaiadas têm sido diversas, sobretudo associadas às incubações aeróbias. Keeney (1982) refere que terão sido desenvolvidas mais de trinta metodologias diferentes. A sua diversidade pode envolver a quantidade de solo utilizada, as condições de incubação, a introdução de aditivos como a areia e/ou vermiculite, a pré-lixiviação, o uso de uma solução de nutrientes, etc.

Na maior parte dos métodos, são utilizados solos muito modificados devido à secagem, crivagem, mistura e re-humedecimento. Também aqui, as combinações possíveis de tratamentos das amostras são numerosas e todas elas têm impacto na mineralização. Alguns métodos tentam a aproximação às condições naturais, usando amostras não perturbadas.

Contudo, a utilização de amostras não perturbadas também apresenta limitações, por exemplo, relativas à variabilidade espacial da mineralização (Jarvis *et al.*, 1996). Para se obterem resultados comparáveis, Robinson (1968) e Boswell *et al.* (1985) consideram que se devem padronizar adequadamente os pré-tratamentos. Outra limitação importante das incubações biológicas é o tempo de duração, que inviabiliza por completo a sua utilização em rotina (Mengel, 1991; Smith e Li, 1993).

As incubações biológicas têm, contudo, fornecido informação importante sobre os mecanismos do processo de mineralização, e permitido a comparação entre diferentes solos em condições controladas (Jarvis *et al.*, 1996). Contudo, estes resultados não são, de forma alguma, comparáveis aos dos ensaios de campo. Na maior parte dos casos, os investigadores tentam fornecer as melhores condições ambientais para a mineralização. Assim, estas técnicas fornecem informação sobre o potencial de mineralização do solo, enquanto que nos ensaios de campo se procura obter a mineralização real. As incubações originam sempre taxas de mineralização tão elevadas que é impensável admitir-se poderem ocorrer em campo. A tentativa de criar, em laboratório, as condições de campo também não conduz aos resultados esperados. Mengel (1991) considera que o mais importante é estabelecer correlações adequadas entre a mineralização em laboratório e o azoto recuperado pelas plantas em campo.

2.2.3.1.1 – Incubações aeróbias

Consistem em incubar solo em condições próximas das ideais para a actividade dos microrganismos que mineralizam a matéria orgânica. Têm sido ensaiadas numerosas variantes de incubação. As principais diferenças estão relacionadas com a duração, temperatura, humidade, arejamento e utilização de correctivos das propriedades físicas. Algumas alterações resultaram da tentativa de encontrar as melhores condições para a actividade dos microrganismos que, desde os estudos de Mahendrappa *et al.* (1966), se admite poderem variar de acordo com a sua adaptação às condições ambientais prevaletentes. A inclusão de materiais orgânicos é também muito frequente, procurando-se informação sobre o seu contributo para a nutrição das plantas.

Os factores que mais contribuem para o grande número de variantes são a duração e a temperatura de incubação. Têm sido ensaiadas incubações aeróbias relativamente curtas, com tempos de incubação de 14 dias (Keeney e Bremner, 1967), e manifestamente longas, com tempos de incubação superiores a 40 semanas (Delphin, 1986). Entre estas situações extremas é possível encontrar todo o tipo de incubações relativamente à sua duração. As temperaturas

de incubação variam desde os 15 °C (Adams e Attiwill, 1986) até temperaturas relativamente elevadas como 37 °C (Bonde e Rosswall, 1987). As temperaturas mais baixas, normalmente entre 15 a 20 °C, são utilizadas para simular a temperatura ambiente.

Nas incubações aeróbias de curta duração acentua-se o efeito dos pré-tratamentos das amostras e aumenta a dependência dos resultados dos resíduos existentes e da sua razão C/N (Stanford *et al.*, 1974; Chescheir *et al.*, 1986). Stanford (1982) considera que estes factores justificam a variação no grau de sucesso que tem havido na relação entre o azoto produzido em incubações de curta duração e o azoto absorvido pelas culturas. As incubações aeróbias de longa duração têm, como principal desvantagem, o facto de serem trabalhosas, caras e muito demoradas. A interferência nos resultados da preparação das amostra e dos resíduos frescos é menor, sobretudo se for lixiviado o azoto mineral que se forma numa pré-incubação de 1 a 2 semanas (Stanford e Smith, 1972; Chichester *et al.*, 1975).

De todas as técnicas de incubação ensaiadas em condições aeróbias têm-se destacado duas. O seu sucesso relativo pode ser avaliado pelo número de vezes que foram repetidas ou adoptadas por outros investigadores. Uma delas é uma incubação de curta duração, que inclui como aditivo a areia (Keeney e Bremner, 1967). A outra é uma incubação de longa duração, com remoção periódica do azoto mineral formado, desenvolvida por Stanford e Smith (1972).

2.2.3.1.1.1 – Incubações aeróbias de curta duração

Keeney e Bremner (1967) incubaram terras misturadas com areia durante 14 dias a 30 °C. A areia foi introduzida como correctivo para promover o arejamento e estimular a mineralização. O método é bastante simples e parece cumprir todos os requisitos de um bom método de incubação. Os autores propõem a mistura de 10 g de terra com 30 g de areia de quartzo (850 a 250 µm) lavada, à qual se adicionam 6 mL de água. Admitem que se for misturada areia nesta proporção quase todos os solos requerem a mesma quantidade de água para a mineralização máxima. Para assegurar o arejamento e evitar perda de água durante a incubação utiliza-se um filme de polietileno para cobertura do recipiente.

Keeney e Bremner (1967) estudaram, especificamente, o efeito da adição da areia. A correlação encontrada entre os valores resultantes das incubações com e sem areia apresentou um coeficiente de determinação de 0,99. Os autores elegeram o método com areia na medida em que é bastante mais simples e os resultados são idênticos. A simplicidade advém do facto de não ser necessário determinar a quantidade de água adequada para cada tipo de solo.

Robinson (1968) verificou que os resultados da incubação com areia estiveram bem correlacionados com o azoto absorvido e com a produção da modalidade testemunha de uma cultura de tomateiro em vasos. Stanford (1982) cita diversos trabalhos, nos quais o método foi repetido com aparente sucesso, a julgar pelas correlações relativamente elevadas entre o azoto mineralizado e o azoto absorvidos pelas plantas em campo, em estufa e com outros índices de disponibilidade de azoto. Gianello e Bremner (1986 a,b, 1988) utilizaram este tipo de incubação para validar os resultados de métodos de extracção química, com os quais estabeleceram correlações. Setatou e Simonis (1994) modificaram a temperatura de incubação para 35 °C. As correlações com o azoto absorvido pelo azevém foram também elevadas.

2.2.3.1.1.2 - Incubações aeróbias de longa duração

Stanford e Smith (1972) tinham por objectivo estudar a capacidade de mineralização no longo prazo de uma população de 39 solos, dos Estados Unidos e Canadá, com propriedades fisico-químicas variadas. O solo era misturado com areia ou argila expandida e colocado a incubar a 35 °C em tubos de lixiviação apropriados. Numa pré-incubação de duas semanas era removido o azoto mineral residual com CaCl_2 0,01 M após o qual era aplicada uma força de sucção de 0,6 a 0,7 bar para assegurar a humidade adequada. Durante a incubação estava prevista a remoção periódica do azoto mineralizado para eliminar efeitos inibidores da actividade dos microrganismos devido à acumulação de produtos de reacção, variação de pH e acumulação de toxinas. A incubação decorria até se poder descrever a relação entre o azoto mineral acumulado e o tempo de incubação. Assim, a incubação podia prolongar-se por mais de trinta semanas.

Desta forma, os autores estudaram o potencial de mineralização dos solos assumindo que este representa uma quantidade bem definida e mensurável que reflecte as características de solo e clima e o seu passado cultural. Este raciocínio acompanha os conceitos prévios de Jenkinson (1968), que considera ser a matéria orgânica composta por uma fracção activa restrita, donde se destaca a biomassa, e por uma fracção muito maior, mas praticamente inerte.

O potencial de mineralização é estimado pelos aumentos cumulativos do azoto mineralizado, baseado no pressuposto de que a taxa de mineralização é proporcional à quantidade de azoto orgânico mineralizável que compõe o substracto. Stanford e Smith (1972) verificaram que a mineralização potencial, N_0 , era dada pela equação de primeira ordem

$\log(N_0 - N_t) = \log N_0 - kt/2.303$, em que N_t representa o azoto mineral acumulado no tempo t , sendo k uma constante de equilíbrio.

Posteriormente foram investigados os efeitos da temperatura (Stanford *et al.*, 1973) e da humidade (Stanford e Epstein, 1974) na constante de equilíbrio. Verificou-se que a variação na temperatura não afectou k . Na gama de temperaturas entre 5 e 35 °C obteve-se um Q_{10} igual a 2. As taxas de mineralização mais elevadas ocorreram para sucções somáticas de 1/3 a 0,1 bar (80 a 90 % da porosidade total com água). A relação encontrada entre o teor de humidade do solo e a mineralização líquida foi praticamente linear ($y = x$) na gama de 1/3 a 15 bar.

A técnica de Stanford e Smith (1972) recebeu muita atenção nos finais da década de 1970 e durante a década de 1980, sendo um método biológico obrigatório a incluir nos estudos de mineralização. Apareceu sempre em posição de destaque em todas as revisões posteriores sobre métodos de avaliar a disponibilidade de azoto nos solos (Campbell, 1978; Keeney 1982; Stanford, 1982; Black, 1993; Cabrera *et al.*, 1994; Campbell *et al.*, 1994) e foi repetida dezenas de vezes com objectivos diversificados (Jenkinson e Ayanaba, 1977; Gianello e Bremner, 1986 a,b; Poovaroom e Tate, 1988; Gharrou *et al.*, 1990; Matar *et al.*, 1991; Wheatley *et al.*, 1996; Mahmoudjafari *et al.*, 1997).

Apesar da sua importância, o método tem sido criticados sobre diversas perspectivas, designadamente pelo facto de ser demorado e trabalhoso, pelo facto de sobrestimar a mineralização relativamente aos resultados de campo e pelo reduzido valor temporal dos resultados obtidos.

Alguns investigadores utilizaram, com sucesso, metodologias próximas da de Stanford e Smith (1972), para estudar o potencial de mineralização dos solos, mas reduzindo ao tempo de incubação (Stanford *et al.*, 1974; Gianello e Bremner, 1986 a,b; Matar *et al.*, 1991). Contudo, a simplificação extrema tem consistido em estimar o potencial de mineralização dos solos com base em métodos de extracção química (Stanford e Smith, 1976; Jalil *et al.*, 1996; Campbell *et al.*, 1997).

O potencial de mineralização obtido em incubações de longa duração é várias vezes superior à mineralização líquida obtida em campo. Stanford *et al.* (1977) verificaram que a beterraba sacarina recuperou apenas 18 % do azoto potencialmente mineralizável estimado pela incubação. Contudo, os resultados da incubação explicaram 80 a 84 % da variação encontrada. Mary e Recous (1994) consideraram que as sobrestimativas se devem à lixiviação de compostos orgânicos solúveis, impedindo-se a imobilização de azoto. Mary e Recous

(1994) referem ainda que o processo fornece melhor informação sobre a mineralização total que sobre a mineralização líquida.

No conceito de Stanford e Smith (1972), o potencial de mineralização define a fracção lábil do azoto orgânico. Assim, seria uma característica intrínseca do solo e, uma vez determinada, poderia ser tida em conta nos sistemas de recomendação de fertilização durante muitos anos. Contudo, Carter *et al.* (1974) ressaltam que a capacidade de mineralização de um solo deve ser determinada com frequência, particularmente se decorrem práticas inusuais de fertilização e/ou de sequências culturais. Também Stanford e Smith (1976) consideram que as modificações culturais radicais podem alterar o potencial de mineralização num curto período de 1 a 2 anos. Assim, admitindo a reduzida validade temporal dos resultados das incubações de longa duração, a sua utilidade restringe-se à calibração de métodos laboratoriais mais rápidos como incubações de curta duração e métodos de extracção química.

2.2.3.1.2 – Incubações anaeróbias

Waring e Bremner (1964) propuseram, como índice de disponibilidade de azoto no solo, a produção de NH_4^+ numa incubação anaeróbia. Desta forma, pretenderam eliminar o efeito da variação do teor de humidade e arejamento durante a incubação. A metodologia consiste na incubação de terra em excesso de água durante 14 dias a 30 °C, seguida de destilação do NH_4^+ formado. Os autores verificaram haver uma boa correlação ($r = 0,96$; $p < 0,001$) entre o resultado da incubação anaeróbia e o azoto mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) produzido numa incubação aeróbia de 14 dias a 30 °C com adição de areia.

Keeney e Bremner (1966) propuseram uma modificação ao método anterior após verificarem que numa incubação anaeróbia de 7 dias a 40 °C, o NH_4^+ libertado aumentava e a correlação com o azoto absorvido pelo azevém melhorava significativamente.

Estas metodologias, sobretudo a variante de Keeney e Bremner (1966), têm sido frequentemente preferidas às incubações aeróbias. Keeney (1982), numa revisão sobre os métodos de avaliar o azoto disponível, recomenda, de entre os métodos biológicos, a incubação anaeróbia de 7 dias a 40 °C pelas vantagens evidentes relativamente às incubações aeróbias. Numa revisão posterior, Dahnke e Johnson (1990) reconhecem também vantagens a este método, designadamente por (i) ser apenas necessário medir o NH_4^+ , (ii) não ser necessário usar aditivos, (iii) dispensar o arejamento e (iv) demorar apenas uma semana. Stanford (1982) refere que estas metodologias têm originado frequentemente melhores correlações com o azoto absorvido por muitas culturas que os próprios métodos aeróbios.

Como principais desvantagens, Keeney (1982) refere que continuam a ser métodos demorados e em muitos estudos não foram encontradas correlações satisfatórias. Keeney e Bremner (1966) verificaram que se o solo contém muita matéria orgânica mal decomposta que flutue no líquido, as correlações com o azoto recuperado pela cultura falham. Outra limitação importante prende-se com a possibilidade do NO_3^- presente no início da incubação poder ser reduzido a NH_4^+ (redução dissimilatória), sendo contabilizado no azoto mineralizado (Robinson, 1967; Stanford, 1982).

Com objectivo de ultrapassar alguns inconvenientes, foram propostas modificações aos métodos originais. Smith e Stanford (1971) sugerem que antes da incubação seja extraído o azoto mineral com CaCl_2 0,01 M e adicionada uma solução de nutrientes sem azoto. Sugerem também que a incubação decorra durante 14 dias a 35 °C. Contudo, esta variante não tem sido repetida.

2.2.3.2 – Extracções químicas

Nas últimas décadas, em praticamente todas as revisões sobre avaliação da disponibilidade biológica de azoto no solo, considerou-se urgente desenvolver um método de extracção química simples e rápido que possa ser utilizado em rotina nos laboratórios, à semelhança do que acontece para os restantes nutrientes menos móveis.

A maior dificuldade resulta do facto das transformações do azoto serem dominadas por reacções biológicas complexas, fortemente dependentes das condições ambientais e culturais (Stanford, 1982). Procurou-se, durante anos, um agente extractante que simulasse a acção dos microrganismos na libertação selectiva da fracção de azoto que fica disponível para as plantas durante a estação de crescimento (Broadbent, 1981; Setatou e Simonis, 1996). Contudo, os testes químicos são empíricos por natureza (Robinson, 1968), e a possibilidade de serem utilizados com sucesso depende da correlação que se consegue com medições biológicas adequadas da disponibilidade de azoto no solo, como a produção e/ou a absorção de azoto (Stanford e Smith, 1976; Stanford, 1982).

O esforço tem sido relevante. Dahnke e Vasey (1973) referem que terão sido ensaiados, até então, 17 métodos diferentes e Broadbent (1981) considera que, mesmo assim, a lista nem sequer é exaustiva. A gama de reagentes utilizada inclui desde a água à temperatura ambiente até ácidos ou bases fortes.

Os procedimentos mais suaves parece serem mais promissores (Stanford, 1982; Jarvis *et al.*, 1996). Apesar de extraírem consideravelmente menos azoto, serão mais selectivos na

fracção que removem, derivando uma elevada proporção do azoto da matéria orgânica biologicamente activa. Os procedimentos mais intensivos removem grandes quantidades de azoto do solo que não estará, realmente, susceptível para mineralização.

As principais vantagens dos testes químicos é serem simples, rápidos e pouco sensíveis aos pré-tratamentos das amostras (Keeney e Bremner, 1966). Contudo, Stevenson (1986) considera que muitos deles são ainda excessivamente demorados para serem aplicados em rotina. Por outro lado, métodos que produzem resultados aparentemente bons, em gamas de solos restritas, não têm tido um comportamento satisfatório quando se alarga a gama de solos em que são ensaiados, devido à influência do clima, solos e sistemas culturais (Broadbent, 1981; Setatou e Simonis, 1996). O objectivo de se conseguir um só teste bem adaptado a uma escala global parece ser, neste momento, uma utopia. Já a perspectiva de se enquadrar cada teste numa base regional pode ser determinante para que, alguns deles, possam, no futuro, ser incluídos na rotina dos laboratórios.

2.2.3.2.1 – Determinação do azoto total

Na determinação do azoto total são utilizados essencialmente dois métodos: (i) método *Kjeldhal*, que consiste numa oxidação por via húmida; (ii) e o método *Dumas*, que é fundamentalmente uma oxidação por via seca (Bremner, 1996).

Na prática, a maior parte dos laboratórios não determinam directamente o azoto total mas sim o carbono orgânico. A determinação do azoto pelo método *Kjeldhal* é considerada muito cara para rotina (Keeney, 1982). Como o teor de azoto na matéria orgânica é relativamente constante ($\approx 5\%$), normalmente determina-se o carbono orgânico oxidável pelo dicromato de potássio (método *Walkley-Black*) por ser simples, rápido e necessitar pouco equipamento. O método *Walkley-Black* apresenta limitações relativamente à fracção de carbono que oxida, não sendo considerado um método verdadeiramente quantitativo (Nelson e Sommers, 1996).

Quando se utiliza a matéria orgânica como indicador da disponibilidade de azoto, assume-se que toda ela se mineraliza por igual. Normalmente aplica-se uma taxa de mineralização anual variável e ajustada aos condicionalismos locais. Em climas temperados, essa taxa admite-se que se situa entre 1 a 3 % (Barber, 1984; Santos, 1996). A determinação do azoto total ou da matéria orgânica tem uma primeira vantagem que resulta do facto de não muito afectada pela preparação da amostra. Outra vantagem é ser estável de ano para ano.

Contudo, esta última pode ser também a sua principal desvantagem, já que não dá informação sobre fertilizações excessivas, falhas na cultura anterior, etc. (Dahnke e Johnson, 1990).

Harmsen e van Schreven (1955) referem que o azoto total raramente tem algum valor como expressão da disponibilidade de azoto para as plantas. Prasad (1965) obteve correlações deficientes entre o azoto total no solo e a absorção do nutriente pelo sorgo em estufa. Keeney e Bremner (1966) ensaiaram várias incubações biológicas e extracções químicas. O azoto total deu piores resultados que os métodos biológicos e que alguns químicos. Diversos outros investigadores encontraram, também, resultados globalmente negativos quando pretenderam relacionar o azoto total ou a matéria orgânica com parâmetros diversos de disponibilidade de azoto no solo (Smith *et al.*, 1977; Stanford e Smith, 1978; Fox e Piekielek, 1978 a; Hong *et al.*, 1990; Jalil *et al.*, 1996). Contudo, Dahnke e Vasey (1973) admitem existir uma relação geral entre o azoto total e a disponibilidade de azoto para as plantas, apesar das muitas irregularidades. Também Stevenson (1982) cita diversos trabalhos entre 1950 e 1980 em que foram encontrados resultados satisfatórios, sobretudo quando se utilizou apenas um tipo de solo ou a população de solos era reduzida.

Do ponto de vista teórico, parece pouco provável que o azoto total se constitua como um bom índice de disponibilidade de azoto, dada a natureza pouco uniforme do substrato. As diferentes fracções do azoto orgânico no solo têm taxas de mineralização diferentes e a sua proporção relativa depende de factores culturais, como a adição de resíduos frescos (Boswell *et al.*, 1985; Jarvis *et al.*, 1996).

2.2.3.2.2 - Método do autoclave

A utilização do cloreto de cálcio (CaCl_2) como agente extractante foi proposta por Stanford (1968) como modificação de um método antigo em que se utilizava água quente. Adicionando CaCl_2 0,01 M, o autor pretendeu criar uma concentração de soluto similar à que ocorre naturalmente em solos não salinos. O método consiste na sujeição da mistura solo/solução a um banho de vapor durante 16 horas.

Stanford e DeMar (1969) utilizaram a solução extractante proposta por Stanford (1968) e acrescentaram a autoclavagem, esperando que o aumento da temperatura e pressão hidrolisasse mais azoto orgânico. A mistura solo/solução era sujeita a autoclave (121 °C e 15 atm) durante a noite (16 horas). No extracto eram determinadas diversas fracções de azoto. Stanford e DeMar (1970) simplificaram o processo determinando nos extractos apenas o N-

NH₃ pelo método de microdifusão Conway. Propuseram também que o N-NH₄⁺ inicial fosse previamente removido.

Smith e Stanford (1971) aplicaram o método do autoclave a 39 solos dos EUA. Compararam os resultados com incubações aeróbias e anaeróbias. As correlações com as incubações anaeróbias tiveram um r^2 de 0,90. Com as incubações aeróbias só foi possível obter correlações satisfatórias ao excluir 5 solos de regiões áridas derivados de calcário. Contudo, a qualidade do resultado foi globalmente superior ao carbono orgânico e azoto total. Stanford e Smith (1976) ensaiaram o método do autoclave para estimar o potencial de mineralização (N_0) através de um procedimento químico. Os autores consideraram que o autoclave estimou N_0 de forma razoável, se excluídos alguns solos derivados de calcários. Outros investigadores obtiveram correlações satisfatórias entre os resultados do método do autoclave e indicadores da disponibilidade biológica de azoto no solo (Smith *et al.*, 1977; Fox e Piekielek, 1978 a).

Keeney (1982) propôs algumas modificações, de forma a simplificar o método para ser utilizado em rotina. Sugeriu que o NH₄⁺ inicial não fosse removido e que fosse feita a destilação directa da suspensão solo/CaCl₂ na presença de óxido de magnésio (MgO). Esta variante viria a ser adoptada pela Sociedade Americana de Agronomia.

Apesar de ter tido alguma popularidade nos anos de 1970 e 1980, o método viria a ter algumas dificuldades de afirmação, sobretudo devido a ter-se comprovado da necessidade de se excluirmos os solos calcários. Por outro lado, Legg *et al.* (1971) utilizando ¹⁵N, demonstraram que o azoto hidrolisado pelo autoclave tinha origem em todas as fracções da matéria orgânica por igual, o que, como se sabe, não pode traduzir adequadamente o processo de mineralização. Em trabalhos mais recentes, Saint-Fort *et al.* (1990) não encontraram qualquer relação entre os resultados do autoclave e o azoto absorvido pelo milho na modalidade testemunha em solos de cinco regiões do Nebraska.

2.2.3.2.3 – Soluções salinas de cloreto de potássio

Os métodos que utilizam o cloreto de potássio (KCl) como solução extractante têm tido uma grande aceitação nos últimos anos, dado o sucesso obtido na maior parte das experiências. Os procedimentos analíticos ensaiados variam na concentração da solução e na temperatura e tempo de extracção.

Gianello e Bremner (1986 a) propuseram a digestão num bloco, à temperatura de 100 °C e durante 4 horas, de uma mistura de solo com uma solução de KCl 2 M. O NH₄⁺ hidrolisado

era obtido pela destilação directa da mistura. A esse valor era subtraído o NH_4^+ hidrolisado num procedimento de referência, que consistia no tratamento das amostras com KCl a frio. Os autores verificaram que os resultados estiveram altamente correlacionados com incubações aeróbias e anaeróbias utilizando 33 solos do Brasil. Gianello e Bremner (1986 a) acrescentaram que o método é rápido e preciso e que os resultados são pouco afectados pelos pré-tratamentos das amostras. Desta forma, consideraram-no como um bom método para rotina. Gianello e Bremner (1986 b) aplicaram o mesmo método a 30 solos do Iowa. As correlações com as incubações biológicas foram superiores a qualquer outro método químico ensaiado.

Na tentativa de encontrar o melhor compromisso relativamente à concentração da solução e tempo de extracção, Smith e Li (1993) ensaiaram diferentes concentrações de KCl (1, 2 e 3 M) e diferentes tempos de extracção (0,5, 1 e 2 horas de fervura). Os testes incidiram sobre 12 solos originários da Escócia. Os autores compararam os resultados com a quantidade de azoto recuperado pelo azevém, cevada e aveia cultivados em vasos. O melhor resultado foi obtido com a solução de KCl 1 M e com uma hora de fervura. As correlações com a exportação pelas diferentes culturas tiveram coeficientes de determinação de 0,85, 0,75 e 0,64, respectivamente.

McTaggart e Smith (1993) compararam os resultados da variante KCl 1 M e 1 hora de fervura com a variante KCl 2 M e 4 horas a 100 °C. Nas experiências foi utilizado fertilizante marcado com ^{15}N . Os resultados da extracção foram comparados com o azoto recuperado na parte aérea de uma cultura de cevada de Primavera em campo. As correlações encontradas foram bastante elevadas, sobretudo com o procedimento mais intensivo.

Em trabalhos recentes, os investigadores têm optado preferencialmente pela variante KCl 2 M e 4 horas a 100 °C, de Gianello e Bremner (1986 a). Jalil *et al.* (1996) e Campbell *et al.* (1997) utilizaram esta metodologia para estimar, por um processo químico, o potencial de mineralização dos solos. As correlações obtidas com os resultados de incubações biológicas foram sempre muito elevadas. Rees *et al.* (1996) encontraram também correlações significativas entre o azoto extraído pelo KCl e o azoto absorvido por cereais. Os estudos de Jalil *et al.* (1996) mostraram ainda não haver qualquer vantagem em subtrair ao resultado o NH_4^+ destilado com KCl a frio.

A utilização de soluções salinas de KCl só muito raramente têm dado resultados insatisfatórios. Fox e Piekielek (1978 a) não encontraram qualquer relação entre o NH_4^+ extraído durante uma hora pelo KCl à temperatura ambiente e a capacidade do solo em

fornecer azoto. Hong *et al.* (1990) também não encontraram resultados satisfatórios, apesar de utilizarem a variante proposta por Gianello e Bremner (1986 a).

2.2.3.2.4 – Solução tampão de fosfato/borato

Gianello e Bremner (1986 b; 1988) descrevem um novo método de extracção química. Propõem a utilização de uma solução tamponizada de fosfato de sódio e borato de sódio ajustada a pH 11,2 com ácido ortofosfórico.

Gianello e Bremner (1986 b, 1988) apresentam um estudo comparativo de diversos métodos de extracção e incubações biológicas, envolvendo 33 solos do Brasil e 30 solos do Iowa com características físico-químicas variadas. Os resultados do novo método estiveram altamente correlacionados com os métodos de incubação biológica.

Vanotti *et al.* (1995) ensaiaram o método do fosfato/borato associado a experiências de campo. Obtiveram correlações elevadas com o azoto exportado pelo milho ($r = 0,80$) e com a produção ($r = 0,76$). Os autores admitem ser possível que o método extraia selectivamente azoto com significado biológico. Jalil *et al.* (1996) utilizaram o método para estimar o potencial de mineralização de 42 solos do Canadá. As correlações obtidas com o azoto mineralizado pela incubação aeróbia de Stanford e Smith (1972) foram consideradas elevadas ($r^2 = 0,73$; $p < 0,001$). Os autores referem que o método se mostrou sensível a diversas variações nas práticas culturais.

Apesar de ser um método ainda pouco aplicado, já foram encontrados resultados insatisfatórios. Hong *et al.* (1990) encontraram uma má correlação ($r = 0,254$) entre o NH_4^+ hidrolisado e a capacidade do solo a fornecer azoto ao milho em campo.

2.2.3.2.5 - Outros métodos de extracção

Nas últimas décadas têm sido utilizados diversos outros extractantes em condições físico-químicas variadas e com diferentes tempos de extracção. As hidrólises ácidas e alcalinas e a oxidação pelo permanganato de potássio (KMnO_4) foram os procedimentos mais utilizados. O uso exclusivo de água fria ou quente merece também ser referido. Na Europa foi desenvolvido um método designado de electro-ultrafiltração, que se apresentou bastante promissor.

As hidrólises recorrendo a ácidos minerais mais ou concentrados, designadamente ao ácido clorídrico e sulfúrico, estão entre os métodos mais utilizados. Quer se utilizem soluções

concentradas ou diluídas, os ácidos minerais removem sempre grandes quantidades de NH_4^+ , sendo este aspecto considerado uma das suas principais limitações, por ser removido azoto biologicamente inerte (Stanford, 1982). A tónica dominante nos resultados foram sempre as correlações insatisfatórias com outros métodos de estimar a disponibilidade de azoto nos solos (Prasad, 1965; Keeney e Bremner, 1966; Robinson, 1968; Fox e Piekielek, 1978 a; Gianello e Bremner, 1986 b).

Os agentes hidrolisantes alcalinos encontram-se entre o grupo de substâncias mais diversificadas. Algumas das bases utilizadas foram o hidróxido de sódio (NaOH), o hidrogenocarbonato de sódio (NaHCO_3), o hidróxido de bário [Ba(OH)_2], o hidróxido de cálcio [Ca(OH)_2] e o carbonato dissódico (Na_2CO_3). Tal como as hidrólises ácidas, removem sempre grandes quantidades de azoto. Apesar de originarem esporadicamente resultados positivos (Fox e Piekielek, 1978 a, b), grande parte dos investigadores obteve resultados sem qualquer utilidade prática (Gianello e Bremner, 1986 b; Hong *et al.*, 1990; Setatou e Simonis, 1996).

Segundo Dahnke e Vasey (1973), o método do KMnO_4 é dos mais antigos e, também, um dos mais testados. Consiste na fervura da mistura do solo com o permanganato de potássio na presença de um ácido ou de uma base. O NH_3 é libertado pelo efeito conjugado da oxidação e hidrólise dos compostos orgânicos. Stanford e Smith (1978) consideraram o método bem adaptado para rotina, por ser simples e rápido, e destacaram as suas vantagens sobre o método do autoclave, na medida em que pode ser utilizado em solos calcários. Stanford e Smith (1978) sugeriram a simplificação do método, já que os efeitos oxidativo e hidrolítico extraem azoto da mesma fracção da matéria orgânica, dando correlações idênticas em separado e em conjunto. De qualquer das formas, as incongruências têm sido abundantes. Em diversos trabalhos não foi encontrada qualquer relação entre os resultados do método do permanganato e outros indicadores da disponibilidade biológica de azoto (Prasad, 1965; Keeney e Bremner, 1966; Jenkinson, 1968; Stanford e Legg, 1968; Gianello e Bremner, 1986 b). Em estudos recentes, este método não tem sido incluído.

Vários métodos utilizam apenas água quente como substância extractante. Apesar de ser removida uma reduzida fracção do azoto total, os resultados podem estar bem correlacionados com a exportação de azoto pelas culturas (Keeney e Bremner, 1966). Verstraeten *et al.* (1970 a) compararam o efeito extractivo da água à temperatura ambiente durante 30 minutos com água a ferver durante 60 minutos. O procedimento mais intensivo removeu 4 a 5 vezes mais azoto, mas a correlação com o azoto mineralizado numa incubação biológica foi inferior. Campbell (1978) e Keeney (1982) previram grande futuro à utilização da água como

substância extractiva. Contudo, num dos poucos trabalhos posteriores em que o método foi utilizado, Setatou e Simonis (1996) não encontraram qualquer correlação satisfatória com o azoto exportado pelo azevém cultivado em vasos nem com a produção do milho, algodão e trigo cultivados em campo.

Németh (1979) desenvolveu o método da electro-ultrafiltração para avaliar a disponibilidade de nutrientes no solo. Consiste em sujeitar a um campo eléctrico as amostras de solo em suspensão. Os espécimes iónicos de carga positiva migram para o cátodo e os de carga negativa migram para o ânodo. Németh (1979) alertou que um hipotético inconveniente do método seria o facto de extrair também algum azoto orgânico, já que, na vizinhança do ânodo e cátodo, prevalecem valores extremos de pH que levam à hidrólise dos compostos orgânicos. Contudo, este aspecto tem vindo a ser apresentado como vantajoso, quando se pretende avaliar a disponibilidade biológica do azoto no solo, na medida em que se supõe tratar-se de uma fracção de azoto facilmente mineralizável.

O fundamento e a descrição pormenorizado do método podem ser vistos em Németh (1979), Németh (1985) e Mengel (1991). Os resultados que têm sido obtidos são bastante animadores, dadas as correlações satisfatórias com métodos biológicos de disponibilidade de azoto (Houba *et al.*, 1986; Appel e Mengel, 1990, 1992; Saint-Fort *et al.*, 1990). Contudo, Houba *et al.* (1986) criticam alguns aspectos do método, designadamente a falta de reprodutibilidade dos resultados e o facto de ser laborioso e caro.

2.2.3.3 – Métodos que utilizam membranas de troca iónica

As membranas de troca iónica evoluíram a partir de resinas de troca na forma de pérolas. A utilização destas resinas foi inicialmente proposta para extrair potássio, tendo posteriormente grande desenvolvimento na extracção de fósforo. Por facilidades laboratoriais, actualmente estes materiais apresentam-se na forma de membranas (Pare *et al.*, 1995).

As membranas de troca são polímeros orgânicos sólidos que possuem carga electrostática que é neutralizada por iões de carga oposta. A carga pode ser positiva ou negativa, dando origem a membranas de troca aniónica e catiónica, respectivamente. A utilização de membranas de troca para extrair azoto mineral foi proposta por Qian *et al.* (1992). Os autores sugerem a extracção simultânea com outros nutriente, designadamente com o fósforo, o enxofre e o potássio. Para a extracção de nitratos não se conhece qualquer referência à utilização de resinas na forma de pérolas.

No caso do azoto, são utilizadas membranas de troca aniónica que extraem o ião nitrato. As membranas de troca aniónica são saturadas com um anião (Cl^- ou HCO_3^-) que fica adsorvido nas cargas positivas da membrana. Na presença do NO_3^- , o anião adsorvido nas membranas é trocado de forma estequiométrica. Colocando, depois, a membrana numa solução concentrada de ácido clorídrico ou ácido sulfúrico, o NO_3^- é eluído e posteriormente determinado por métodos apropriados (Pare *et al.*, 1995).

Qian *et al.* (1992) compararam os resultados da extracção do NO_3^- com membranas de troca e com uma solução de CaCl_2 0,01 M em 135 solos do Canadá. A extracção do nutriente esteve significativamente correlacionada entre os dois métodos. Foram também encontradas correlações altamente significativas ($r^2 = 0,60$) entre o azoto extraído pela membrana e o azoto absorvido pela colza. Os autores sugerem este método para rotina devido à qualidade dos resultados, simplicidade, baixo custo e por permitir a determinação simultânea de vários elementos, incluindo cationes se forem utilizadas adicionalmente membranas de troca cationica.

Pare *et al.* (1995) propuseram a determinação directa do teor de nitratos no solo sem colheita de terras. As experiências consistiram em enterrar as membranas durante 15 dias em solos cultivados com milho. Verificaram que o azoto adsorvido pela membrana e o azoto extraído em laboratório pelo KCl 2M estiveram altamente correlacionados e apresentaram um r^2 de 0,78. Os autores sugeriram este método como alternativa à extracção com KCl , já que o último introduz perturbações nos resultados, devido à colheita e preparação da amostra e à mineralização que ocorre antes da determinação. Consideraram, também, o processo mais simples já que não é necessário colher solo, secar, extrair, filtrar, etc.. Como pode ser usado para outros iões apresenta também vantagens económicas.

Qian e Schoenau (1995) utilizaram as membranas em incubações biológicas laboratoriais. Os autores enterraram directamente as membranas no solo a incubar para adsorverem os iões libertados pela mineralização da matéria orgânica. A extracção do ião nitrato com uma solução de CaCl_2 0,01 M no fim do período de incubação foi usada como método de referência. Os processos de extracção foram comparados entre si e com o azoto absorvido pelas plantas num estudo envolvendo 74 solos do Canadá. O ião nitrato retido nas membranas durante duas semanas esteve melhor correlacionado com o azoto absorvido pelas plantas que o método de referência. Segundo os autores, com as membranas consegue-se obter a influência dos factores ambientais e culturais no azoto mineralizado.

2.2.3.4 – Avaliação da disponibilidade do azoto dos correctivos orgânicos

Actualmente, a utilização de estrumes e outros materiais orgânicos de origem industrial e urbana como fertilizantes tem renovado interesse, não tanto por motivações económicas mas, sobretudo, por preocupações ambientais. Raijmakers e Janssen (1993) admitem uma utilização crescente pela agricultura de materiais orgânicos, sobretudo de origem urbana, dado o volume em que são produzidos.

O maior desapontamento com a utilização destes materiais é que, ao contrário dos fertilizantes de síntese, não se consegue prever o seu comportamento no solo ou avaliar adequadamente o seu valor fertilizante. A eficiência de utilização do azoto dos correctivos orgânicos e resíduos das culturas varia consideravelmente de experiência para experiência, dependendo do material utilizado e das condições de utilização. De forma a dar uso racional aos estrumes e resíduos das culturas e inseri-los nos esquemas de fertilização, é necessário desenvolver testes químicos, simples e rápidos, que forneçam informação sobre que quantidade de azoto e qual a variação temporal da sua disponibilidade para as culturas (Rodrigues e Coutinho, 1998; Rodrigues *et al.*, 1999).

As linhas básicas de investigação que fornecem informação sobre a disponibilidade do azoto dos materiais orgânicos para as culturas consistem em análises laboratoriais e estudos de campo. As análises laboratoriais podem incidir exclusivamente sobre os correctivos orgânicos, procurando que alguma das suas fracções traduza o comportamento do material no solo. Quando incidem sobre a mistura solo/fertilizante é comum dividi-los em testes químicos e incubações biológicas e, no essencial, são utilizadas as mesmas metodologias referidas em 2.2.3. As técnicas de campo consistem na avaliação da variação do azoto mineral no solo ao longo do tempo após a aplicação dos estrumes (Chambers e Smith, 1992; Goffart e Guiot, 1993), na avaliação da produção e/ou recuperação do azoto pelas culturas quando fertilizadas com materiais orgânicos (Bitzer e Sims, 1988; Mataruka *et al.*, 1993; Paul e Beauchamp, 1993; Rodrigues, 1995) ou através da medição do seu efeito residual nas culturas subsequentes (Baldock e Musgrawe, 1980; Chambers *et al.*, 1996).

O desenvolvimento das séries de decomposição (*decay series*) são, de entre as técnicas de campo, as mais elaborados. Fornecem informação sobre a forma com o azoto dos fertilizantes orgânicos se torna disponível para as plantas ao longo dos anos e auxiliam na determinação das quantidades a aplicar (Pratt *et al.*, 1976 b). Uma série de decomposição de 0,50, 0,10, 0,05 significa que no primeiro ano fica disponível para as plantas 50 % do azoto

orgânico aplicado e nos segundo e terceiro anos seguintes torna-se disponível 10 e 5 % do azoto orgânico, respectivamente.

Cada correctivo orgânico apresenta uma série de decomposição diferente. Esta é uma das grandes limitações da metodologia, devido à grande variabilidade de materiais orgânicos utilizáveis como fertilizante. Tendo por base a exportação pela cultura do milho, Beauchamp (1987) elaborou as seguintes séries de decomposição:

ureia.....	0,39, 0,15, 0,03, 0,00;
chorume de aviário.....	0,31, 0,11, 0,01, 0,00;
chorume de bovinos leiteiros	0,12, 0,07, 0,04, 0,02;
estrume de bovinos de engorda	0,11, 0,06, 0,03, 0,01.

Para além da composição do resíduo, as séries de decomposição dependem de outros factores, como a textura do solo. Magdoff (1978) propõe as seguintes séries de decomposição, para um estrume de vaca, em função da textura do solo:

solo argiloso	0,35, 0,15, 0,10, 0,075, 0,05;
solo arenoso	0,60, 0,15, 0,10, 0,075, 0,05.

As técnicas que procuram indicadores da disponibilidade de azoto na composição dos fertilizantes orgânicos são, também, muito comuns. Em vários estudos tem-se tentado estabelecer relações entre determinados constituintes do material e a mineralização. Alguns dos mais utilizados são a razão C/N, a percentagem de azoto, o teor de lenhina e o conteúdo em fenóis. Todos estes constituintes exercem algum efeito na mineralização, mas pouco se sabe da sua importância relativa. A razão C/N tem sido o indicador mais utilizado, já que está quase sempre disponível, mas tem dado resultados variáveis se usado como único factor (Jarvis *et al.*, 1996). Coutinho *et al.* (1998) verificaram que o conteúdo em azoto inorgânico presente nos resíduos e no sistema foi, em conjugação com a razão C/N, dos factores mais decisivos. A lenhina e os fenóis isoladamente não são bons previsores da mineralização, mas auxiliam quando integrados com indicadores como o conteúdo em azoto (Jarvis *et al.*, 1996).

As incubações biológicas e os testes químicos são frequentemente utilizados para obter informação sobre a mineralização de fertilizantes orgânicos. A maior parte dos investigadores ensaia os mesmos métodos desenvolvidos para os solos (Castellanos e Pratt, 1981; Chescheir *et al.*, 1986; Douglas e Magdoff, 1991; Serna e Pomares, 1992; Gristina *et al.*, 1996; Toledo *et al.*, 1996). Um método diferente, baseado numa técnica utilizada para determinar a

digestibilidade da proteína nos alimentos para animais, foi ensaiada por Castellanos e Pratt (1981). É conhecido como o método da digestão pela pepsina e, basicamente, consiste na digestão da amostra, previamente lavada com éter, em 0,2 % de pepsina e ácido clorídrico a 0,075 N.

Castellanos e Pratt (1981) ensaiaram vários testes químicos e incubações biológicas, como índices de disponibilidade de azoto, em dez estrumes diferentes. O melhor resultado foi obtido com a digestão pela pepsina, que explicou 80 % da variância encontrada no azoto disponível, avaliado pela exportação de nutriente na cevada e no sorgo cultivados em estufa. Serna e Pomares (1992) registaram, também, que o método da digestão pela pepsina forneceu os melhores resultados sobre a disponibilidade de azoto em várias lamas de ETAR, relativamente a outros testes químicos, avaliada pela exportação na cultura do milho.

Tal como para os solos, a utilização de um índice específico para os materiais orgânicos não tem tido sucesso relevante, apesar de alguns estudos terem sido obtidos resultados encorajadores, eventualmente porque a utilização de um índice químico simplifica, em demasia, o processo complexo da libertação de azoto dos estrumes.

2.2.4 – Técnicas de incubação *in situ*

A necessidade de se recorrer a incubações *in situ* resulta de não ser aceitável admitir que os testes químicos e as incubações biológicas laboratoriais reflectam, adequadamente, as taxas de mineralização que ocorrem em campo. Os métodos laboratoriais, químicos ou biológicos, fornecem apenas estimativas relativas ou índices de disponibilidade de azoto correlacionáveis com a extracção pelas culturas. Com as incubações *in situ* pretende-se obter valores próximos da mineralização líquida real, dada a proximidade às condições naturais.

O primeiro método de incubação *in situ* a ser desenvolvido, e provavelmente o mais ensaiado, foi proposto por Eno (1960). Consiste na incubação de solos perturbados em sacos de polietileno fechados e enterrados de forma a integrar o efeito das flutuações diárias de temperatura. Na ausência de absorção radicular e lixiviação, a variação de azoto inorgânico no tempo fornece uma medição directa da mineralização ou imobilização líquida. Segundo Westermann e Crothers (1980), o polietileno assegura as trocas gasosas (O₂ e CO₂) e evita as perdas de água e a difusão do ião nitrato.

Westermann e Crothers (1980) utilizaram a metodologia base de Eno (1960) para medir a mineralização em solos cultivados com milho e batata e em solos não cultivados. Os autores determinaram os nitratos de forma sequencial em períodos de 10 a 14 dias. A avaliação

sequencial dos nitratos é determinante para minimizar os efeitos da variação do teor de humidade dentro e fora dos sacos e evitar a acumulação de azoto inorgânico e o seu efeito inibitório na mineralização. A importância deste refinamento foi posteriormente realçado por outros investigadores (Adams e Attiwill, 1986; Raison *et al.*, 1987; Hatch *et al.*, 1990). Westermann e Crothers (1980) encontraram uma correlação elevada ($r = 0,95$) entre o azoto mineralizado dentro e fora dos sacos em solos não cultivados. O azoto inorgânico formado nos sacos e o azoto absorvido pela cultura estiveram também bem correlacionados ($r = 0,98$, excluindo dois pontos estranhos). Com poucas modificações, a técnica dos sacos enterrados tem sido repetida com objectivos diversos e em condições variadas (Müller, 1988; Müller e Sundman, 1988; Boone, 1990; Mazzarino *et al.*, 1991; Hall *et al.*, 1994).

Alguns investigadores tentaram ultrapassar a perturbação no processo de mineralização/imobilização introduzido pela crivagem, secagem e re-humedecimento das terras ensaiando uma metodologia que consiste na colocação de colunas de solo pouco perturbado em tubos de PVC ou metálicos (Adams e Attiwill, 1986; Raison *et al.*, 1987). Os tubos são cheios pressionando directamente sobre o solo. A técnica é versátil porque os tubos evitam a absorção pelas plantas e, tapados com placas de *petri* invertidas, evitam a lixiviação. O tipo de material utilizado parece não influenciar os resultados (Raison *et al.*, 1987). O método reduz a importância das flutuações de humidade dada a continuidade com o solo na parte inferior ou em pequenos orifícios abertos para este efeito. Os tubos são fáceis de manusear e mais difíceis de destruir que os sacos. Como desvantagens, refira-se que as raízes podem re-entrar nos tubos e os nitratos podem entrar ou sair por difusão e fluxo capilar.

Subbler *et al.* (1995) utilizaram as técnicas dos sacos de polietileno e dos tubos enterrados para efeitos comparativos. Os resultados não permitiram esclarecer qual dos métodos era mais fiável para estimar as transformações do azoto em campo.

Hatch *et al.* (1990) procuraram evitar que a desnitrificação originasse subestimativas da mineralização líquida. Os autores incubaram amostras não perturbadas em contentores selados com acetileno. O acetileno inibe a oxidação do azoto amoniacal pela *Nitrosomonas* a muito baixa concentração, não sendo afectada a mineralização. Trindade (1997) utilizou também esta metodologia para avaliar a mineralização de azoto orgânico em solos de Noroeste.

As incubações *in situ* não ultrapassam todas as dificuldades da medição da mineralização em campo. Ambos os processos de incubação referidos decorrem na ausência de raízes vivas. Contudo, as raízes fornecem aos microrganismos quantidades apreciáveis de carbono, pelos exsudados radiculares e pela deposição de material celular, estimulando o

processo de mineralização e competindo, em simultâneo, pelo azoto mineral com os microrganismos (Rees *et al.*, 1994).

Hook e Burke (1995) estudaram os efeitos da presença de raízes e da crivagem em terras incubadas em tubos de alumínio. Verificaram que a crivagem altera a dinâmica do azoto. Contudo, a remoção das raízes promoveu a mineralização de forma não consistente. Parece não haver dúvidas que a presença de raízes vivas estimula a actividade dos microrganismos. Contudo, fica por esclarecer qual o saldo líquido do processo mineralização/imobilização.

As técnicas de incubação *in situ* têm sido muito ensaiadas em ecossistemas florestais (Adams e Attiwill, 1986; Raison *et al.*, 1987; Fisk e Schmidt, 1995) e em pastagens naturais (Mazzarino *et al.*, 1991; Hall *et al.*, 1994; Hook e Burke, 1995), onde a principal fonte de azoto para as plantas tem origem na mineralização da matéria orgânica. Contudo, por motivações ecológicas, começam a ser técnicas frequentes no estudo de solos agrícolas (Westermann e Crothers, 1980; Müller, 1988; Müller e Sundman, 1988; Boone, 1990; Vinther, 1994; Subbler *et al.*, 1995).

2.2.5 – Sistemas de recomendação de fertilização

Neste ponto são discutidos, apenas, os sistemas de recomendação de fertilização baseados em análises de terras. Os sistemas que incluem o diagnóstico do estado nutritivo das plantas serão revistos em 2.3.

Os sistemas de recomendação de fertilização combinam, necessariamente, as seguintes etapas: (i) avaliação das necessidades das plantas; (ii) estimativa da disponibilidade natural de azoto nos solos; e (iii) avaliação da eficiência de utilização do azoto aplicado. É com base nestas três etapas que se calcula a quantidade de azoto a aplicar (Boswell *et al.*, 1985; Wild, 1988; Santos, 1996).

A avaliação da necessidade das plantas é um processo pacífico, que tem por base a exportação de azoto nas colheitas. O azoto que fica nas raízes e nos restolhos é ignorado. Assume-se que essas partes vão dar um contributo idêntico ao azoto que retiveram para as culturas seguintes. A eficiência de utilização do azoto pelas culturas depende de diversas práticas culturais e da dinâmica do nutriente no solo, tendo o assunto sido amplamente revisto em 2.1.5. O que distingue os sistemas de recomendação de fertilização é, sem dúvida, a forma como têm em conta a disponibilidade natural de azoto no solo. É este aspecto que será desenvolvido no presente ponto.

2.2.5.1 – Azoto inorgânico no perfil

Durante muitos anos, o azoto inorgânico no perfil não foi tido em conta nos programas de fertilização, devido à natureza transitória das formas minerais e ao facto da sua concentração no solo ser, normalmente, muito baixa (Harmsen e van Schreven, 1955). Contudo, a sua inclusão nos sistemas de recomendação de fertilização tem tido interesse crescente. Stanford (1982) considera que a sobrefertilização tem aumentado o azoto inorgânico no solo e que, mesmo com fertilizações racionais, pode resultar um grande excesso de azoto se, por qualquer motivo, o ano não permitir um bom desenvolvimento da cultura.

A utilização isolada do azoto inorgânico como base da recomendação de fertilização é considerada desadequada se: (i) existirem diferenças apreciáveis no potencial de mineralização dos solos (Mengel, 1991); e (ii) em regiões húmidas, onde o NO_3^- residual tem pouco valor, por poderem ocorrer perdas apreciáveis num curto período de tempo (Stanford, 1982; Jalil *et al.*, 1996). Em regiões áridas e semi-áridas, como nos sistemas cerealíferos dos Estados Unidos e Canadá, a utilização do azoto mineral residual tem grande aceitação (Stanford, 1982; Campbell *et al.*, 1997). A quantidade limitada de precipitação permite que as perdas por lixiviação e desnitrificação sejam mínimas. Também em culturas em que a fertilização azotada possa afectar negativamente a qualidade, como na cevada do malte e na beterraba sacarina, tem tido particular interesse incluir informação sobre o azoto mineral no perfil (Smith, 1977).

Para se determinar o azoto a aplicar como fertilizante, o modelo, na sua versão mais simplificada, resume-se a subtrair às necessidades das plantas o azoto mineral no perfil. Stanford (1982), para descrever o processo, toma como exemplo a cultura do trigo. Considera que, naquelas condições, são necessários 0,9 kg de azoto para produzir 27,2 kg de trigo. Se o agricultor espera produzir 2018 kg ha^{-1} , são precisos 67 kg N ha^{-1} . Se a quantidade de N-NO_3^- no perfil for de 45 kg ha^{-1} , consegue-se uma produção de trigo de 1345 kg ha^{-1} sem adição de azoto. Assim, para atingir a produção esperada devem ser aplicados via fertilizante 20 a 25 kg N ha^{-1} .

Na prática, os sistemas de recomendação não costumam ser tão simples. Normalmente são complementados com informação diversa, variável entre laboratórios, referente aos sistemas culturais e à previsão da estação de crescimento. Campbell *et al.* (1997) referem que a quantidade de água armazenada no perfil e a precipitação esperada são sempre incluídas para se definir o potencial de produção. Outras variáveis, como a distribuição da precipitação,

os regimes térmicos e os sistemas radicais das culturas podem ser tidos em conta a nível local ou regional (Stanford, 1982).

Na Europa Central, o sistema de recomendação corrente baseia-se na determinação do azoto inorgânico ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) em amostras de solo frescas colhidas no início da estação de crescimento a 60 a 90 cm de profundidade (Houba *et al.*, 1986; Mengel, 1991; Sheperd *et al.*, 1996). Segundo Mengel (1991), a recomendação surge da seguinte forma: define-se um nível crítico (uma cota) inferior às necessidades absolutas das plantas, ficando uma ligeira reserva para a mineralização. Se a cultura necessitar de 250 kg N ha^{-1} , a cota define-se em 200 kg N ha^{-1} e o fertilizante que se aplica calcula-se subtraindo a essa cota o valor do azoto mineral no perfil. Na prática, este método também tem em conta o azoto mineralizado, se bem que incluído de uma forma empírica.

O sistema europeu tem sido muito criticado porque, naquelas condições, o teste tem de ser feito bastante próximo da sementeira. Isto obriga a que as determinações laboratoriais sejam feitas em curtos períodos de tempo. Por outro lado, a profundidade a que são efectuadas as colheitas tem criado alguma relutância por parte dos agricultores a aderir ao sistema (Mengel, 1991). Nos Estados Unidos, não são os agricultores que recolhem as amostras. Existem empresas que dispõem de equipamento especializado para esse fim. São vários os estados em que se recomenda a colheita de terras a 180 cm de profundidade. As firmas estão, normalmente, associada à venda de fertilizantes e o preço torna-se acessível para os agricultores. Em zonas áridas, a determinação laboratorial também não necessita de ser feita imediatamente antes da sementeira. Por vezes, utiliza-se na Primavera a informação sobre o azoto mineral no perfil obtida antecipadamente no Outono (Magdoff *et al.*, 1984; Dahnke e Johnson, 1990).

2.2.5.2 – Sistemas que incluem índices de disponibilidade de azoto no solo

Engels e Kuhlmann (1993) verificaram que o contributo do solo para a nutrição das plantas pode variar desde 7 a 316 kg N ha^{-1} durante uma estação de crescimento, dependendo, entre outros factores, do precedente cultural. Assim, nos sistemas culturais em que a mineralização possa variar de forma significativa, é urgente utilizar métodos que prevejam o contributo quantitativo do processo.

A necessidade de se utilizar um índice de mineralização é tanto maior quanto mais falível for o uso do azoto mineral residual. Assim, é particularmente importante em: (i) climas quentes e húmidos, em que o azoto inorgânico tem valor residual reduzido (Donhaue *et al.*,

1977); (ii) em regiões em que os níveis de matéria orgânica nos solos sejam muito variáveis (Stanford, 1982); e (iii) em sistemas culturais complexos, mesmo se equilibrados no longo prazo, devido às flutuações anuais de disponibilidade de azoto (Boswell *et al.*, 1985).

A grande limitação deriva do facto dos testes químicos e biológicos até hoje desenvolvidos não garantirem segurança nos resultados (Rice e Havlin, 1994). Dos diversos procedimentos ensaiados, o teor de matéria orgânica é aquele que tem sido mais utilizado. Keeney (1982) divulga uma tabela em que figuram vários estados americanos onde se utiliza a matéria orgânica como indicador da mineralização de azoto. Pela mesma tabela podemos constatar que apenas no estado de Idaho se utiliza um método de incubação biológica, e no Mississippi um método químico. Stanford (1982) refere que o método do permanganato alcalino é utilizado em vários laboratórios na Índia, sobretudo associado à cultura do arroz. Em Portugal, é comum utilizar-se a matéria orgânica como indicador da disponibilidade de azoto no solo.

Nos sistemas de recomendação de fertilização em que se utilizam índices de mineralização, a estimativa do azoto libertado pela matéria orgânica é subtraída ao azoto necessário, obtendo-se o azoto a aplicar (Danheke e Johnson, 1990). Por vezes são incluídos refinamentos associados a condições edafo-climáticas ou culturais particulares. Santos (1996), utilizando a matéria orgânica como indicador da disponibilidade de azoto no solo, sugere taxas de mineralização diferentes para os diferentes períodos do ano, ajustamentos à duração dos ciclos culturais, ajustamentos às situações de regadio, etc.

Atendendo a que o azoto disponível para as plantas é a soma do azoto inorgânico no solo no início do ciclo cultural com o azoto mineralizado durante a estação de crescimento, o modelo teórico de recomendação de fertilização deveria incluir estes dois componentes (Stanford, 1982; Rice e Havlin, 1994; Geypens e Vandendriessche, 1996). Nesse sentido, alguns investigadores (Carter *et al.*, 1974; Lindén *et al.* 1992 a,b) demonstraram que, utilizando o azoto inorgânico em conjunto com um índice de mineralização, se melhora a previsão das necessidades de fertilizante a aplicar.

Na Alemanha e na Áustria foi introduzido o método da electro-ultrafiltração para servir de base à recomendação da fertilização azotada da beterraba sacarina (Mengel, 1991; Geypens e Vandendriessche, 1996). Como, por esta técnica, são determinados o azoto mineral e compostos solúveis de azoto orgânico de baixo peso molecular, espera-se que reúna as vantagens da utilização do azoto inorgânico e de índices da mineralização da matéria orgânica. Contudo, as virtudes da electro-ultrafiltração estão ainda a ser debatidas. Geypens e

Vandendriessche (1996) consideram que o ponto crítico não são as estimativas da mineralização com base na fracção orgânica, mas o valor do azoto inorgânico residual.

2.2.5.3 – Método dos balanços

Em França utiliza-se, de forma generalizada, o chamado método dos balanços (Black, 1993; Geypens e Vandendriessche, 1996; Justes *et al.*, 1997). Antes da estação de crescimento começar é estabelecido o balanço de entradas e saídas de azoto. De acordo com Geypens e Vandendriessche (1996), as necessidades de fertilizante para a cultura do trigo podem ser calculadas com base na expressão

$$bY = (Nm + Ms + Mr + Mo + F) . C$$

em que: b representa o azoto absorvido por unidade de produção de grão; Y a produção esperada; Nm o azoto mineral no fim do Inverno; Ms , Mr e Mo o azoto mineralizado da matéria orgânica do solo, dos resíduos das culturas e dos estrumes, respectivamente; F o fertilizante a aplicar; e C a eficiência de utilização do azoto.

O método integra, de facto, grande parte dos componentes de que deveria depender a recomendação da fertilização azotada. Contudo, muitos deles são quantificados de uma forma empírica, não tendo por base qualquer tipo de determinação analítica, pelo que não nos parece haver diferenças meritórias particulares relativamente aos métodos anteriormente apresentados.

2.2.5.4 – Método indirecto

O método indirecto não se baseia em análises de terras mas sim em variáveis locais relacionadas com o potencial de mineralização. Funciona com a atribuição de créditos a precedentes culturais como as leguminosas e à aplicação de estrumes. Este método de recomendação de fertilização é utilizado na Inglaterra e no País de Gales (MAFF, 1985), sendo mesmo conhecido pelo sistema de recomendação do Reino Unido (Shepherd *et al.*, 1996).

O método indirecto assume as dificuldades em prever a mineralização e as suas irregularidades. Shepherd *et al.* (1996) defendem que o uso do azoto mineral residual não é adequado para estas regiões, devido à grande extensão de áreas húmidas, nas quais a lixiviação é contínua durante todo o ano. A utilização de índices de disponibilidade de azoto

apresenta ainda maiores limitações. Mary e Recous (1994) compararam vários métodos químicos e biológicos para prever a mineralização líquida da matéria orgânica e nenhum deles deu origem a resultados satisfatórios. Wild (1988) considera que o método indirecto, embora empírico, é bem aceite e muito fácil de pôr em prática.

O método funciona pela atribuição de créditos (0, 1 ou 2) a cada precedente cultural. A disponibilidade natural de azoto aumenta de 0 para 2. O índice 0 é atribuído, por exemplo, aos cereais praganosos, ao milho, à beterraba quando é removida a parte aérea e a hortícolas pouco fertilizadas. O índice 1 é atribuído a culturas como o feijão, a forragens sob pastoreio, a oleaginosas e à batata. O índice 2 é atribuído a qualquer cultura frequentemente estrumada, aos prados de longa duração e de boa qualidade se fertilizados e à luzerna.

Normalmente é tida em conta apenas a última cultura para atribuir o índice. Contudo, para pastagens de longa duração e para a luzerna ajusta-se o índice em função da distância temporal do seu fim até à cultura actual. A luzerna, por exemplo, mantém o índice 2 no primeiro e segundo ano após o corte, adquire o índice 1 no terceiro ano e retoma o índice 0 a partir do quarto ano. Com a aplicação de estrumes, recomenda-se uma redução na aplicação de azoto tendo em conta a quantidade, o tipo e a composição do estrume.

Na recomendação propriamente dita, a cada crédito corresponde uma dada redução na quantidade de azoto a aplicar. O método tem ainda em conta a produção esperada e pode incluir ajustamentos de acordo com variáveis locais de carácter edáfico e com as técnicas de aplicação dos fertilizantes (MAFF, 1985).

Boswell *et al.* (1985) referem a utilização de sistemas de créditos idênticos ao do Reino Unido nalguns estados americanos. Os autores citam exemplos em que à luzerna, como precedente cultural, são atribuídos entre 55 a 155 kg N ha⁻¹, dependendo do número de anos que esteve instalada, e à soja entre 20 a 55 kg N ha⁻¹. O crédito aos estrumes é da ordem de 2,5 kg N ha⁻¹ por tonelada de estrume.

2.2.5.5 – Métodos de optimização dinâmica

Os métodos de optimização dinâmica consistem na aplicação de quantidades moderadas de azoto no início da estação de crescimento. Normalmente aplica-se metade a dois terços do azoto sugerido por um dos sistemas de recomendação atrás referidos. O ajustamento final é feito em adubações de cobertura, atendendo ao azoto inorgânico determinado em terras colhidas em fases bem definidas do ciclo cultural.

Magdoff *et al.* (1984) consideram que o teor de nitratos no solo em fases específicas do ciclo (*presidedress nitrate test*, PSNT) integra o efeito de todos os factores que influenciam a disponibilidade de azoto para as plantas e está directamente relacionado com a capacidade do solo em fornecer nutriente. O azoto determinado durante o ciclo pouco ou nada tem a ver com o azoto inorgânico residual inicial, já que, entretanto, este teria sido absorvido pelas plantas em crescimento.

O método permite a utilização racional do azoto, aumentando a eficiência de utilização e reduzindo as perdas potenciais para o ambiente. Duriex *et al.* (1995) compararam o sistema de recomendação do Reino Unido e o sistema de optimização dinâmica. O segundo originou uma redução do teor de nitratos no solo no final do ciclo e, conseqüentemente, menores perdas durante o Inverno. Os estudos decorreram durante quatro anos com o milho inserido em diversas situações culturais.

Os métodos de optimização dinâmica podem ter por base o PSNT ou análises de tecidos vegetais. Utilizando indicadores do estado nutritivo, como o teor de nitratos, o azoto total ou o teor de clorofila em tecidos específicos das plantas, infere-se sobre a oportunidade de se aplicar azoto em cobertura, ajustando melhor a quantidade de fertilizante às necessidades das culturas. Este assunto será retomada em 2.3.7.

2.2.5.6 – Recomendação da fertilização azotada em Portugal

As análises de rotina da globalidade dos laboratórios do país prevêm a determinação da matéria orgânica como principal indicador da capacidade do solo em fornecer azoto para as culturas. Nos boletins de análise são, normalmente, incluídos outros parâmetros que permitem fazer ajustamentos a situações particulares. Alguns deles são a topografia da parcela, a profundidade do solo, o passado cultural e a fertilização dos anos anteriores.

O Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva, numa publicação de 1984 (LQARS, 1984), calcula a quantidade de azoto a aplicar com base na produção esperada sem, explicitamente, ter em conta qualquer outro critério de disponibilidade actual ou potencial de azoto no solo. Contudo, no seu boletim de análises também está prevista a determinação da matéria orgânica e o registo de diversos outros elementos de carácter local.

Atendendo à informação disponível, a recomendação de fertilização azotada é, em grande medida, subjectiva e está positivamente dependente da sensibilidade do técnico responsável pela recomendação e da forma como integra os elementos recolhidos na quantificação do azoto a aplicar.

2.3 – Diagnóstico do estado nutritivo das plantas

2.3.1 - Conceitos e terminologias

No diagnóstico do estado nutritivo das plantas efectuam-se, fundamentalmente, dois tipos de determinações, que na terminologia anglo-saxónica se designam de: (i) *total analysis* ou *tissue analysis*, para as determinações multielemento, utilizando técnicas laboratoriais precisas; e (ii) *tissue tests*, onde se incluem apenas os métodos expeditos, normalmente de campo, cuja análise incide no suco celular dos tecidos frescos e onde se determina, normalmente, apenas um de entre os macronutrientes principais N, P e K ou, ainda mais frequentemente, apenas uma sua fracção. Na língua portuguesa, Santos (1996) opta pelos termos *análise total* e *análise de tecidos vegetais* para a primeira e segunda designações, respectivamente.

No diagnóstico do estado nutritivo das plantas nem sempre se utilizam os elementos nutrientes ou as suas fracções. Por vezes, recorre-se à determinação de metabolitos como a clorofila, aminoácidos e mesmo à actividade de certas enzimas. Lucena (1994) designa este grupo de determinações de *diagnóstico bioquímico*.

Neste trabalho vão ser utilizadas as seguintes designações: (i) *análise de tecidos vegetais*, para os métodos laboratoriais de análise; (ii) *testes rápidos de tecidos*, para os métodos expeditos, onde se inclui também a estimativa do teor de clorofila nas folhas recorrendo a um aparelho portátil; e (iii) *análise de plantas*, que será entendida em sentido lato englobando as duas primeiras designações. O termo *análise foliar*, apesar de se ter generalizado, não é utilizado neste trabalho, dado as imprecisões que acarreta, na medida em que cada vez mais tecidos, que não as folhas, são usados no diagnóstico do estado nutritivo das plantas.

A sintomatologia visual também pode auxiliar no diagnóstico do estado nutritivo das plantas, apesar de fornecer apenas informação de carácter qualitativo. Contudo, o tema não será desenvolvido, dado a sua especificidade não se enquadrar no âmbito deste trabalho.

2.3.2 - Utilidade e limitações

As metodologias associadas à análise de plantas começaram a ser desenvolvidas ainda no século XIX. Os primeiros investigadores procuravam uma alternativa à análise de terras,

como técnica de diagnóstico da fertilidade dos solos, e que fornecesse também informação sobre o estado nutritivo das plantas.

Inicialmente começou por haver alguma controvérsia sobre a importância relativa de cada metodologia, mas rapidamente os investigadores reconheceram que análise de terras e análise de plantas não deviam ser entendidas como alternativas, mas sim como complementares (Smith, 1962). Como nenhuma das metodologias fornece uma informação completa (Chapman, 1961; Marschner, 1986; Geypens e Vandendriessche, 1996), a controvérsia sobre qual oferece informação mais sólida para fazer recomendações de fertilização não faz sentido. Segundo Marschner (1986), em cada situação concreta cada técnica fornece informação que a outra não concede.

Com a análise de terras procura-se indicação sobre a disponibilidade potencial do elemento durante a estação de crescimento, ou seja: pretende-se prever se o solo pode suportar as necessidades nutricionais das culturas (Coutinho, 1989). A análise de plantas baseia-se no princípio de que a concentração do nutriente na planta integra todos os factores que afectam o seu crescimento, incluindo a disponibilidade de nutrientes no solo, fornecendo informação sobre o estado nutritivo actual (Melsted *et al.*, 1969; Gupta e Saxena, 1976 b; Batey, 1977; Munson e Nelson, 1990; James *et al.*, 1994). Desta forma, é possível verificar se os nutrientes estão em níveis adequados, em excesso ou em deficiência, mas nada nos diz, por exemplo, sobre a origem de um desequilíbrio nutritivo (Palazzo *et al.*, 1993).

A utilização da análise de plantas, como base da recomendação da fertilização, tem tido algum sucesso em pomares, vinhas e outras culturas perenes. Em culturas anuais a sua utilização, com este objectivo, é menos atractiva (MacKay e Leefe, 1962). As flutuações que ocorrem nos níveis de nutrientes com o tempo, associadas a taxas de crescimento elevadas e, sobretudo, a ciclos culturais de curta duração são limitações importantes.

Em culturas anuais, a reduzida duração da estação de crescimento não permite que se faça o diagnóstico e se corrija com eficiência, sendo os resultados desta técnica considerados apenas úteis para o ano seguinte. Contudo, para o azoto, como não existem técnicas de análise de terras calibradas e universalmente aceites (Dahnke e Johnson, 1990), e como pode ser aplicado com eficiência em cobertura (Roberts *et al.*, 1989), a utilização da análise de plantas como base de recomendação de fertilização é, cada vez mais, uma técnica corrente. Utilizam-se, sobretudo, testes rápidos de tecidos que podem fornecer informação, em cada momento, sobre o estado nutritivo das plantas, permitindo tomar decisões atempadas da necessidade de se aplicar azoto em cobertura. Em resumo, com os testes rápidos a análise de plantas passa a ser simultaneamente uma técnica de diagnóstico e de intervenção, mesmo em culturas anuais.

2.3.3 - Disponibilidade de nutrientes, crescimento e composição mineral das plantas

A relação entre a concentração de um dado nutriente nos tecidos das plantas e o crescimento/produção, em função da disponibilidade de nutrientes no meio, apresenta regiões bem definidas (figura 1). O fornecimento de um dado nutriente a uma planta deficiente origina um aumento no crescimento, enquanto a concentração do nutriente na planta pouco ou nada se altera (figura 1 a, *zona de concentração mínima*). Se mais nutriente for disponibilizado, o crescimento continua a aumentar, agora acompanhado pelo aumento da concentração do nutriente nos tecidos (figura 1 b, *zona de transição*). Continuando a aumentar o fornecimento do nutriente, o crescimento atinge o máximo e ocorre uma acumulação rápida do nutriente na planta (figura 1 c, *zona de consumo de luxo*). Se mais nutriente estiver ainda disponível, a sua acumulação na planta continua e a produção pode decrescer (figura 1 d, *zona de toxicidade*).

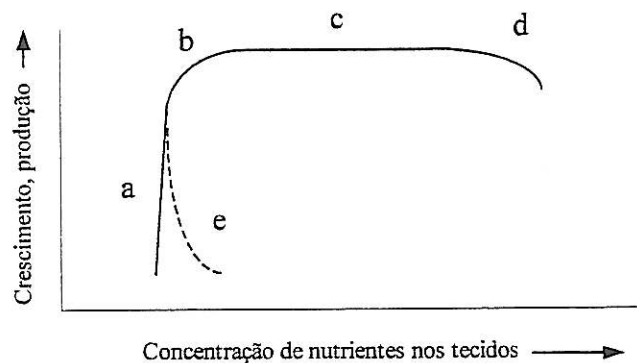


Figura 1 - Relação entre a concentração dos nutrientes nos tecidos e o crescimento/produção (adaptado de Smith, 1962).

A relação entre a concentração de nutrientes nos tecidos e o crescimento pode apresentar aspectos particulares. O troço a tracejado (figura 1 e) traduz uma situação atípica em que o aumento da disponibilidade de um nutriente conduz à redução da concentração desse nutriente na planta. Jarrell e Beverly (1981) consideram esta resposta surpreendente, na medida em que existe a assunção implícita de que o fornecimento de um nutriente está positivamente relacionado com a sua concentração nos tecidos. O fenómeno foi observado pela primeira vez por Steenbjerg (1951) em situação de extrema deficiência de cobre e ficou conhecido por efeito *Steenbjerg* (Smith, 1962; Jarrell e Beverly, 1981). Alguns autores (Bates,

1971; Marschner, 1986) designam o fenómeno por efeito *Piper-Steenbjerg*, destacando também os trabalhos pioneiros de Piper sobre o assunto na década de 1940.

O efeito Steenbjerg tem sido observado quase exclusivamente para micronutrientes. Hiatt e Massey (1958) registaram o fenómeno em situação de carência extrema de zinco e avançaram as seguintes teorias explicativas: (i) as plantas jovens têm nos seus tecidos zinco em quantidades mais elevadas. Assim, as plantas deficientes, ao atrasarem-se no desenvolvimento, mantêm níveis de nutriente mais elevados que as plantas não deficientes que progridem para estados fenológicos mais avançados; (ii) as plantas perdem o seu potencial de crescimento em condições de extrema deficiência mas continuam a acumular o elemento. Ulrich e Hylton (1968) registaram o fenómeno em azevém italiano quando diagnosticavam o estado nutritivo sulfurado utilizando como indicadores o enxofre (S) total e o S orgânico. Os autores explicaram o resultado pelo facto das plantas deficientes terem maior proporção de nós relativamente ao tecido dos entrenós e os primeiros terem teores de S mais elevados. Mais tarde, Jarrell e Beverly (1981) avançaram uma nova teoria explicativa. Os autores consideram que quando uma carência extrema é suprimida pela adição do elemento deficiente a taxa de acumulação de matéria seca ocorre a ritmo mais elevado que a absorção do nutriente, originando a sua diluição nos tecidos das plantas.

A interferência do efeito Steenbjerg na interpretação dos resultados parece impossível de ultrapassar pela análise de plantas. Ulrich e Hills (1973) sugerem que amostrar cedo, enquanto a deficiência não é tão severa, pode ajudar a ultrapassar o problema. Bates (1971) considera que, na maior parte das experiências, não esteve garantida uma técnica de amostragem correcta por não terem sido amostrados tecidos da mesma idade fisiológica. O autor não ignora, contudo, o fenómeno e sugere que a solução é amostrar tecidos diferentes ou outras fracções do nutriente, tal como fizeram Ulrich e Hylton (1968), que em vez do S total ou do S orgânico passaram a utilizar o sulfato. Jarrell e Beverly (1981) consideram que o efeito Steenbjerg tem pouca importância prática. Referem que na maior parte das vezes em que se registou o fenómeno este foi forçado com a introdução de modalidades testemunha altamente deficitárias num dado nutriente.

2.3.4 – Factores que afectam a composição mineral das plantas

Uma das grandes limitações da análise de plantas, e que tem dificultado a sua generalização como técnica de diagnóstico, diz respeito ao facto da variação na composição

das plantas depender de muitos outros factores que não a disponibilidade de nutrientes no meio em que se desenvolvem.

Nas primeiras décadas do século XX, uma grande parte dos investigadores sentia-se impotente e desmotivada para lidar com a variabilidade do teor de nutrientes nos tecidos das plantas, tal era a quantidade de factores de variação identificados. Ulrich (1943) refere que o desânimo era tal que alguns autores chegaram a sugerir que esta técnica de diagnóstico era de evitar, em virtude de fornecer resultados impossíveis de interpretar. Contudo, a persistência de alguns, que sempre encontravam utilidade nos resultados obtidos, foi permitindo que a investigação progredisse. A subsequente escolha dos melhores tecidos da planta, das melhores datas de amostragem e, pelo geral, do aumento do conhecimento de como esses factores influenciam a composição das plantas foi permitindo fazer progressos na interpretação dos resultados e validando esta técnica de diagnóstico.

Para se perceber melhor a importância da questão é revista, sumariamente, a forma como alguns factores influenciam a composição mineral das plantas.

2.3.4.1- Estado fenológico das plantas e idade dos tecidos

A composição química de um tecido vegetal é um processo dinâmico que está sujeito a mudanças durante a estação de crescimento. A seguir ao efeito da aplicação de nutrientes, a idade fisiológica da planta é o factor que mais afecta a sua composição química (Smith, 1962; Marschner, 1986) e, conseqüentemente, mais interfere com a interpretação dos resultados da análise de plantas.

Os dados publicados demonstram que a concentração de uma parte importante dos elementos nutrientes varia durante o crescimento e a maturação das plantas. Por norma, os níveis dos elementos móveis decrescem com a idade da planta, enquanto a concentração dos elementos menos móveis tende a aumentar. Mills e Jones (1996) apresentam como variação geral o decréscimo de N, P, K, S, Cu e Zn e o acréscimo de Ca, Mg, Al, B, Fe e Mn.

Os nitratos são uma fracção não metabolizada de azoto, normalmente utilizada como indicador do estado nutritivo azotado. O decréscimo do teor de nitratos nas plantas foi registado, entre outras culturas, na beterraba (Carter *et al.*, 1971; Giles *et al.*, 1977; Gilbert *et al.*, 1981), na batateira (Lorenz, 1944; Gardner e Jones 1975; Tyler *et al.*, 1983; Loon *et al.*, 1987; Evanylo e Zehnder, 1988; Roberts e Cheng, 1988; Porter e Sisson, 1991a; Westcott *et al.*, 1991) e no algodão (Sunderman *et al.*, 1979; Keisling *et al.*, 1995; Tewolde *et al.*, 1995). A taxa de decréscimo depende do azoto aplicado (Gardner e Jones, 1975), do nível de nitratos

no perfil no início da estação de crescimento (Giles *et al.*, 1977) e da capacidade do solo em fornecer azoto a partir das reservas orgânicas (Porter e Sisson, 1991a).

No caso dos elementos móveis, como o azoto, em que a sua concentração decresce com a idade das plantas, o fenómeno é explicado, em parte, pelo facto de nas fases iniciais as plantas absorverem mais azoto que as suas necessidades, acumulando-se o nutriente nos tecidos. Nas fases posteriores, a acumulação dos produtos da fotossíntese é mais rápida que a absorção de nutriente, levando à sua diluição (Kropff e Spitters, 1990; Peeters e van Bol, 1993). Assim, a diluição do nutriente com o tempo reflecte uma mudança na estrutura e anatomia da planta, traduzida pela deposição de glúcidos estruturais e pela acumulação de compostos de reserva. A concentração do nutriente nos tecidos decresce, também, devido à sua redistribuição na planta. Nos tecidos mais velhos, as proteínas são degradadas e o azoto é translocado, na forma de aminoácidos, para as partes em crescimento (Kropff e Spitters, 1990; Berchtold *et al.*, 1993).

A idade de uma planta pode ser definida em termos cronológicos ou fisiológicos (Bates, 1971; Walworth e Muniz, 1993). Duas plantas cuja emergência ocorre na mesma data têm, durante o ciclo, a mesma idade cronológica. Mas, se o seu desenvolvimento for desigual, devido a diferentes condições ambientais, elas podem estar, numa data particular, em estados fenológicos diferentes, tendo, portanto, idades fisiológicas distintas.

A idade fisiológica das plantas é, como já foi referido, um dos factores que influencia a sua composição química. Assim, reportar os resultados a uma idade fisiológica bem definida é uma forma de ultrapassar as limitações impostas por este factor de variação (Gallo *et al.*, 1965; Doll *et al.*, 1971). Contudo, é necessário definir estados fenológicos que decorram em curtos espaços de tempo e que sejam fáceis de identificar (MacKay e Leefe, 1962). Infelizmente, nalgumas culturas o processo não é fácil, na medida em que não existem escalas fenológicas bem definidas e globalmente aceites, como acontece com a batateira (Martins, 1990).

No caso da cultura da batata têm sido usadas várias estratégias. Dias após a plantação foi utilizada, entre outros, por Porter e Sisson (1991 a, 1993), Rykbost *et al.* (1993), Singh (1993), Werstermann *et al.* (1994 b) e Meyer e Marcum (1998). Apresenta grandes limitações na medida em que nesta cultura o período de emergência pode variar consideravelmente, dependendo das condições de abrolhamento dos tubérculos semente. Dias após a emergência é outro critério muito utilizado (p. ex. Doll *et al.*, 1971; Lauer, 1985; Millard e Marshall, 1986; Roberts e Cheng, 1988; Errebhi *et al.*, 1998). Apresenta, como dificuldade, a obrigatoriedade de se definir e registar a data de emergência, o que pode levantar algumas

dificuldades práticas. Alguns autores reportaram os resultados em função de estados fenológicos diversos (Gardner e Jones, 1975; Baethgen e Alley, 1989; Evanylo, 1989 a,b; Nitsch e Varis, 1991). Contudo, nesta cultura, são praticamente impossíveis de repetir. Evanylo (1989 a,b), por exemplo, sugere o início da tuberização como uma data adequada para avaliar o estado nutritivo da cultura. Para além de ser um estado fenológico difícil de detectar e que envolve análises destrutivas, o início da tuberização depende de diversos factores, incluindo a idade fisiológica dos tubérculos/semente. Rhue *et al.* (1986) sugerem a utilização do conceito de graus dia. Os autores trabalharam em condições ecológicas muito variadas, o que limita a utilização de qualquer outro dos critérios anteriores. Contudo, a utilização de uma escala de graus dia apresenta limitações inerente ao próprio conceito, discutidas em Pinto (1988), e também pelas dificuldades práticas de se ter esta informação disponível.

É conveniente distinguir, também, idade da planta de idade dos tecidos vegetais. Plantas em idades avançadas podem continuar a formar tecidos jovens, por exemplo na extremidade dos caules. A utilização de tecidos jovens com a mesma idade fisiológica permite, em parte, ultrapassar o problema da redistribuição dos nutrientes na planta. Alguns tecidos jovens reflectem a forma como os nutrientes estão a ser absorvidos. Vitosh e Silva (1996) verificaram que, aplicando azoto em cobertura na cultura da batata, os nitratos nos pecíolos das folhas mais jovens com o limbo expandido interrompiam o seu declínio, chegando mesmo a aumentar em função da disponibilidade do nutriente no meio.

2.3.4.2 – Escolha do tecido e sua posição na planta

Para um determinado estado fenológico, está bem documentada a variação na composição mineral das plantas entre as suas diferentes partes, órgãos ou tecidos. Praticamente sem excepção, já todos os tecidos vegetais foram utilizados em análise de plantas, desde folhas, limbos, pecíolos, caules, raízes, flores e frutos.

As folhas são consideradas o laboratório químico das plantas, onde grande parte dos elementos nutrientes se encontram (Smith, 1962). São dos órgãos mais importantes em análise de plantas e utilizadas em, praticamente, todas as culturas (Mills e Jones, 1996). Normalmente, usam-se em análises multielemento e, caso não haja especificação em contrário, elege-se a folha mais jovem com o limbo completamente expandido.

Os tecidos condutores, como os pecíolos das folhas e os caules, têm hoje uma utilização tão diversificada como as folhas. São utilizados para avaliar fracções solúveis de elementos

nutrientes. Estes tecidos são locais de transporte e acumulação da fracção não metabolizada de nutrientes e têm-se revelado, frequentemente, mais sensíveis que as folhas na avaliação do estado nutritivo das culturas (Gallo *et al.*, 1965; Gardner e Jones, 1975; Friedrich *et al.*, 1979).

A utilização de pecíolos generalizou-se, entre outras, em culturas como a batateira (Gallo *et al.*, 1965; Gardner e Jones, 1975; Gupta e Saxena, 1976 a; Loon *et al.*, 1987; Roberts e Cheng, 1988; Westcott, *et al.*, 1991; Singh, 1993; Vitosh e Silva, 1994; Fontes *et al.*, 1996), a beterraba sacarina (Carter *et al.*, 1974; Gilbert *et al.*, 1981; Oliveira *et al.*, 1993), o morangueiro (Lacroix, 1994), o algodão (Sunderman *et al.*, 1979; Keisling *et al.*, 1995; Tewolde *et al.*, 1995) e a soja (Melsted *et al.*, 1969). Elege-se o pecíolo da folha mais jovem com o limbo completamente expandido.

A utilização de partes de caules é comum em culturas que não têm pecíolos, como o trigo (Roth *et al.*, 1989; Boesce, 1994; Justes *et al.*, 1994), a cevada e a aveia (Westcott *et al.*, 1998) e o milho (Sims *et al.*, 1995; Jeminson e Fox, 1988; Binford *et al.*, 1990; Blackmer e Schepers, 1994). A utilização de caules não é, contudo, exclusiva de gramíneas. Em batateira, também têm sido utilizadas determinadas partes dos caules. Nitsch e Varis (1991) utilizaram a base dos caules, enquanto Westermann *et al.* (1994 b) sugerem as suas extremidades superiores. Em hortelã-pimenta, Westcott *et al.* (1994) utilizaram as partes internodais próximas do ápice dos caules.

O uso de tecidos condutores, sobretudo de pecíolos, tem visto a sua utilização alargada muito para além da avaliação da fracção solúvel dos elementos. São, cada vez mais, propostos para análises diversificadas, incluindo a determinação da totalidade de elementos (Roberts e Dow, 1982; Westermann *et al.*, 1994 b).

Diversos outros tecidos continuam a ser recomendados em situações particulares. As raízes, por exemplo, são consideradas os tecidos mais adequados para detectar níveis tóxicos de metais pesados (Smith, 1962; Bates, 1971; Mills e Jones, 1996). No entanto, Warncke (1996) utilizou as raízes da cenoura para avaliar o estado nutritivo da planta na globalidade dos elementos mais importantes. O grão de milho foi utilizado, com bastante sucesso, por Pierre *et al.* (1977 a,b) na avaliação retrospectiva do estado nutritivo azotado da cultura. Por vezes em cereais, nas primeiras fases do seu desenvolvimento, utiliza-se a totalidade da parte aérea (Batey, 1977; Boesce, 1994).

O tecido utilizado na avaliação do estado nutritivo das plantas nem sempre é o que origina melhores resultados estatísticos. Ulrich (1950), com base em estudos em beterraba

sacarina, considerou os pecíolos das folhas mais velhas melhores que qualquer outro tecido. No entanto, por razões relacionadas com a necessidade de normalizar o processo de amostragem, sugerem a utilização do pecíolo da folha mais jovem com o limbo completamente expandido. Em favor deste tecido pesou também o facto de ser considerado de maior importância do ponto de vista fisiológico. Argumentos idênticos apresentaram Melsted *et al.* (1969) para as folhas de soja. Na cultura da batata, a utilização do pecíolo da folha mais jovem com o limbo expandido foi criticado por Nitsch e Varis (1991) e por Westermann *et al.* (1994 b). Os autores consideram que essa folha é difícil de seleccionar. Por outro lado, Westermann *et al.* (1994 b) demonstraram que as folhas jovens em crescimento apresentam teores de nitratos muito variáveis, sendo elevado o risco de se influenciarem os resultados pelo processo de amostragem. Consideram, ainda, que colhendo caules se evita a separação dos pecíolos dos folíolos. Contudo, é preciso também notar que aquele procedimento é mais destrutivo.

A posição dos tecidos nas plantas merece também algumas considerações. Em culturas arbóreas, como laranjeiras (Koo e Sites, 1956) e oliveiras (Brito, 1974-76) têm sido registadas variações na composição das folhas em função da sua posição na copa. É frequente a ocorrência de diferenças das partes interiores para as exteriores, das partes mais baixas para as mais altas e mesmo de acordo com a orientação. A presença ou ausência de frutos nos ramos é, também, motivo de variação na composição das folhas.

Para as culturas anuais, a composição dos tecidos também varia em função da sua posição na canópia. Olson e Kurtz (1982) referem que, numa planta de milho, o azoto decresce do topo para a base. Na beterraba sacarina, a composição das folhas varia da parte exterior para a parte interior da planta (Castelo Branco *et al.*, 1993). Contudo, para as culturas anuais, a posição física dos tecidos na planta é difícil de dissociar do efeito da sua idade fisiológica. Tecidos em posição diferente têm, necessariamente, idades fisiológicas diferentes. Por exemplo, a última folha expandida de uma planta de milho é aquela que assume uma posição mais alta na canópia, mas é simultaneamente a folha mais jovem.

Por vezes, recomenda-se, na mesma planta, a utilização de tecidos diferentes de acordo com o nutriente a analisar. Nos crisântemos, por exemplo, usam-se as folhas superiores dos ramos para avaliar elementos como o azoto, cálcio, enxofre, ferro e boro, as folhas inferiores para o potássio, magnésio e zinco e as médias para avaliar o cobre. Para o fósforo e manganês considera-se ser indiferente utilizar folhas superiores ou inferiores (Mills e Jones, 1996).

2.3.4.3 – Interação entre nutrientes

As interações que se estabelecem entre os elementos nutrientes são de natureza muito complexa e os seus efeitos exercem-se na composição das plantas e interferem com a interpretação dos resultados.

Smith (1962) distingue dois tipos fundamentais de interação: (i) *interações verdadeiras*, onde se incluem os efeitos correntemente designados de *antagonismo* e *sinergismo* iónico; e (ii) *efeitos de diluição*, que traduzem, por uma razão ou por outra, um aumento da matéria seca com redução da concentração do elemento em causa. Jarrell e Beverly (1981) designam de *efeitos interactivos* os antagonismos e sinergismos verdadeiros e de *efeitos não interactivos* os fenómenos de diluição e também de concentração, o inverso de diluição. Marschner (1986) reserva as designações de *interações específicas* para os fenómenos de sinergismo e antagonismo iónico e para o *efeito de substituição* entre elementos minerais, e de *interações não específicas* para os efeitos de diluição e concentração.

Sinergismo e antagonismo iónico aparecem na bibliografia como a acção que dado nutriente pode exercer sobre outro(s) afectando a sua absorção e/ou utilização pela planta. Quando um elemento reforça o efeito de outro(s) no crescimento e promove o aumento da sua concentração nos tecidos da planta, o efeito é designado de sinergismo. Quando a aplicação de um nutriente restringe a absorção e/ou utilização de outro(s) designa-se de antagonismo. Prevot e Ollagnier (1961) referem que o efeito se pode exercer pela interferência ou competição na absorção, na translocação ou na utilização no local de destino.

Os fenómenos de antagonismo estão melhor documentados e são mais abundantes na bibliografia. Um bom exemplo é o efeito antagónico que o potássio exerce sobre o magnésio. Um excesso de potássio provoca a lixiviação de magnésio, devido à competição pelos locais de troca reduzindo a sua disponibilidade (Simpson, 1986). O fenómeno acentua-se nas monocotiledóneas já que estas têm maior facilidade de absorver monovalentes (Santos, 1996). A competição exerce-se também a nível celular. Dada a maior solubilidade do potássio, acentua-se o risco de deficiência de magnésio (Marschner, 1986). Os principais antagonismos e sinergismos conhecidos são revistos em Jarrell e Beverly (1981).

As causas que levam à diluição ou concentração de nutrientes podem ser diversas. As condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento das plantas estão, normalmente, associadas a efeitos de diluição, pelo estímulo na acumulação de matéria seca. Pelo contrário, frios intensos, ou outro *stress* ambiental qualquer, levam normalmente à concentração de nutrientes. A aplicação de um elemento nutriente em deficiência provoca, também, a diluição

de todos os restantes, ao promover o desenvolvimento das plantas. O efeito Steenbjerg traduz uma situação particular de diluição de um nutriente pela aplicação do próprio nutriente. O conceito de diluição é também aplicado à diminuição do teor da maior parte dos elementos nutrientes que ocorre durante o ciclo (Jarrell e Beverly, 1981).

O efeito de substituição é atribuído a situações em que parte das funções de um dado nutriente nas plantas podem ser substituídas por outro. Os estudos de Magnitski (1961), na região de Moscovo, revelaram que a presença de sódio natural ou aplicado causava uma diminuição nos níveis dos outros catiões (Ca, Mg e K) nos tecidos da beterraba sacarina. O aumento dos níveis de sódio relativamente ao potássio não provocava redução na produção, antes pelo contrário. O autor sugeriu, desde logo, que o diagnóstico do estado nutritivo em K estava dependente dos níveis de Na. Hylton *et al.* (1967) estudaram as inter-relações do K e do Na em azevém italiano, bem como a influência do Na na concentração crítica do K. Concluíram, também, que o Na pode substituir parcialmente o K e que a concentração crítica do K está muito dependente da concentração do Na.

A distinção entre os diferentes tipos de interacção nem sempre terá sido a mais correcta. Smith (1962) considera que, por vezes, terão sido interpretado muitos resultados como efeitos de antagonismo, de sinergismo e de diluição, sem se ter um controlo conveniente das experiências. Jarrell e Beverly (1981) desenvolveram o tema e propõem a interpretação dos resultados com base na análise conjunta da variação da percentagem de nutriente, da totalidade do nutriente e da acumulação de matéria seca para distinguir, adequadamente, entre os efeitos interactivos e não interactivos.

2.3.4.4 – Factores genéticos

Diversos aspectos da nutrição das plantas, como a absorção, translocação, utilização e armazenamento de nutrientes, são controlados geneticamente (Olson e Kurtz, 1982; Mills e Jones, 1996; Fageria *et al.*, 1997). Por isso, as diferentes categorias taxonómicas, desde classes, famílias, géneros, espécies e genótipos dentro da mesma espécie, apresentam certas semelhanças entre si. Por exemplo, as espécies da família das leguminosas normalmente possuem teores elevados de azoto nos seus tecidos, enquanto algumas crucíferas tendem a absorver enxofre em quantidades relativamente elevadas (Mills e Jones, 1996).

As características similares aumentam dos níveis hierárquicos superiores para os inferiores, à medida que se reduz a variabilidade genética. Facilmente se aceita que, para as diferentes espécies cultivadas, seja necessário estabelecer normas de interpretação de

resultados individuais. Quando se trata de diferentes genótipos dentro da mesma espécie (cultivares), embora se admita haver diferenças entre eles, e os resultados publicados confirmam-no (Howlett, 1961; Maynard e Barker, 1972; Chevalier e Schrader, 1977; Holm e Nylund, 1978; Intrigliolo *et al.*, 1993; Porter e Sisson, 1991 a), interessa esclarecer, para cada caso, se a magnitude das diferenças justifica o estabelecimento de normas individuais.

Melsted *et al.* (1969) questionaram até que ponto as diferenças entre híbridos de milho e variedades de soja afectam a interpretação dos resultados. As diferenças encontradas foram mais importantes nas cultivares de soja. Contudo, utilizando a última folha expandida para análise o problema foi ultrapassado. Brown e Smith (1966), em estudos sobre acumulação de nitratos em diversas espécies hortícolas, com vista a avaliar o perigo para a saúde, não encontraram diferenças significativas entre variedades.

Na cultura da batata têm sido diversos os estudos em que se procurou avaliar as diferenças entre variedades. Lewis e Love (1994) encontraram diferenças estatísticas no teor de nitratos nos pecíolos entre sete cultivares de batata. Os autores admitem que as diferenças possam afectar os níveis críticos. Singh (1993) comparou o comportamento de uma cultivar precoce, a Kufri Chandramuki, com uma tardia, a Kufri Badshah. A cultivar precoce revelou sempre níveis de nitratos mais baixos ao longo do ciclo. Este poderia parecer um importante critério a ter em conta no isolamento de diferenças entre cultivares. Contudo, em estudos posteriores, Vitosh e Silva (1996) verificaram que as cultivares precoces Onaway e Superior apresentaram valores médios de nitratos nos pecíolos mais elevados que várias cultivares tardias. Apesar das diferenças registadas, ambos os investigadores consideraram que as diferenças, embora significativas, não obrigariam à utilização de normas de interpretação individuais para as cultivares.

Embora o assunto não esteja de todo esclarecido, facilmente se compreende que se os investigadores acharem ser necessário estabelecer normas individuais para cada cultivar, o desinteresse pela análise de plantas será evidente, sobretudo para a maioria das culturas anuais, dada a facilidade com que aparecem novos híbridos e variedades no mercado e com que outros(as) perdem interesse comercial.

2.3.4.5 – Pragas, doenças e tratamentos fitossanitários

Os efeitos das pragas e doenças na composição das plantas e a sua influência na interpretação dos resultados não têm sido muito estudados. Jarrell e Beverly (1981) consideram que as doenças, sobretudo as viroses, normalmente levam à acumulação de

nutrientes, na medida em que retardam o crescimento das plantas e pouco interferem com o processo de absorção. Neste sentido, Ulrich e Hills (1973) referem que a beterraba sacarina apresenta níveis superiores de nitratos quando as plantas estão infectadas com o vírus amarelo, relativamente a plantas sãs.

Resultados diferentes têm sido obtidos por outros investigadores. Malavolta *et al.* (1993) verificaram que os níveis de P, K e Ca decresciam se os citrinos estavam infectados com o vírus tristeza. Também Ruijter e Haverkort (1994) verificaram que a infecção da batateira pelo nemátodo *Globodera pallida* conduziu à diminuição da acumulação de matéria seca e à redução dos teores de N, P e K nos tecidos. Em Portugal, Brito (1974-76) verificou que a presença de fumagina não alterou de forma significativa os teores de N, P, K e Ca nas folhas de oliveira. Diversos outros exemplos do efeito de pragas e doenças na composição química de várias plantas são apresentados por Martin-Prével (1987).

Os tratamentos fitossanitários podem ser um problema adicional pelo efeito na sanidade e desenvolvimento das plantas, pelo efeito potencial na população microbiana do solo com influência na disponibilidade dos elementos nutrientes e pelos resíduos dos pesticidas. Evanylo e Zehnder (1988) verificaram que o aldicarbe, um insecticida sistémico usado para combater insectos do solo, aumentou a produção de tubérculos pelo efeito positivo na duração da área foliar, mas não teve qualquer influência na composição das plantas. Mills e Jones (1996) assumem a existência de efeitos potenciais dos pesticidas, sobretudo dos fungicidas, na população microbiana relacionada com a disponibilidade biológica dos nutrientes. Contudo, parece não haver estudos que apresentem resultados quantitativos. A contaminação dos tecidos com resíduos de pesticidas e a sua lavagem tem sido um assunto mais discutido que os anteriores. A lavagem dos tecidos é de certa forma polémica na medida em que pode haver lixiviação de nutrientes (Reuther, 1961; Whitney *et al.*, 1985). Na prática laboratorial considera-se que a lavagem não é necessária, a menos que as plantas estejam particularmente contaminadas com poeiras ou restos de pesticidas (Jones *et al.*, 1990; Mills e Jones, 1996). Contudo, é considerada imprescindível se o ferro e o alumínio forem elementos a determinar (Mills e Jones, 1996). Na descontaminação, que deve ser rápida, usam-se soluções muito diluídas de detergentes sem fósforo, seguida da lavagem do detergente com água de boa qualidade (Jones e Case, 1990; Mills e Jones, 1996).

2.3.4.6 – Factores ambientais

Todos os factores que influenciam o processo de crescimento e a disponibilidade biológica dos nutrientes no solo interferem na composição mineral das plantas. A luz, a

temperatura, a disponibilidade de água, o arejamento, a reacção do solo, entre outros, são factores responsáveis por fenómenos de diluição ou concentração de nutrientes (Jarrell e Beverly, 1981).

A luz tem sido dos factores ambientais mais estudados. Não tanto pela sua componente intensidade, mas pelo efeito indirecto provocado pelo sombreamento mútuo das plantas. Também as flutuações cíclicas diárias que ocorrem nos níveis de nutrientes têm sido objecto de estudo, com vista a definir a hora do dia mais adequada para o processo de amostragem.

No plano teórico, o aumento da intensidade luminosa promove a acumulação de matéria seca, dando origem a fenómenos de diluição de nutrientes (Jarrell e Beverly, 1981). Mills e Jones (1996) referem que o teor de azoto em espinafres se reduziu de 4,8 % a menos de 2,0 % quando se passou de 600 a 2400 velas/pé sem fertilização azotada e de 5,3 % para 4,7 % com a aplicação de 300 kg N ha⁻¹. Contudo, num estudo em que se controlou a intensidade luminosa, Proebsting e Kenworthy (1954) tinham verificado que a concentração de azoto nas folhas de ginjeira (*Prunus cerasus*) foi consideravelmente mais elevada com a radiação máxima relativamente a 50 e 30 % da saturação do aparelho fotossintético.

As variações de luminosidade afectam de forma particular o teor de nitratos. Hageman *et al.* (1961) estudaram o efeito do sombreamento provocado pela maior densidade de plantas em milho. As plantas mais densas apresentaram maior teor de nitratos. Os autores atribuíram o resultado à redução da actividade da nitrato redutase, com o aumento consequente dos níveis de nitratos nos tecidos. Resultados diferentes foram obtidos em algodão por Sunderman *et al.* (1979). Os autores verificaram que o aumento da densidade das plantas provocou um decréscimo na concentração de nitratos nos pecíolos. O resultado foi atribuído à utilização mais rápida do azoto disponível por ter sido dividido por um maior número de plantas.

A hora do dia é frequentemente mencionada nas normas de colheita de material vegetal se está prevista a avaliação de nitratos (Santos, 1996; Justes *et al.*, 1997). Admite-se que as flutuações diárias de nitratos estão relacionadas com a actividade da nitrato redutase e esta está directamente dependente da intensidade luminosa, decrescendo durante a noite e recuperando a actividade durante o dia.

Minotti e Stankey (1973) estudaram as flutuações diárias de nitratos numa variedade de beterraba hortícola. A amostra incluiu a totalidade da planta. Os valores de nitratos atingiram o máximo entre as 4 e as 8 horas da manhã e decresceram para metade às 4 horas da tarde. Com base em estudos envolvendo diversas hortaliças, Scaife *et al.* (1983) consideraram pouco importantes as flutuações diárias dos níveis de nitratos. Na cultura do trigo, Papastylianou (1995) admitiu que as diferenças encontradas não interferem com o diagnóstico do estado

nutritivo, não sendo importante incluir a hora do dia na norma de colheita. Por questões de segurança, Laurent e Justes (1994) e Justes *et al.* (1997) aconselham as duas primeiras horas do dia após o sol nascer, embora refiram expressamente que não têm uma base estatística para o justificar.

Vitosh e Silva (1996) estudaram a variação diária da concentração de nitratos nos pecíolos da última folha recentemente madura em batateira. Os valores aumentaram desde as oito da manhã até ao meio dia e decresceram durante a tarde. Contudo, as diferenças não foram significativas. Os autores justificaram o resultado pela variação do potencial de água dos tecidos durante o dia, uma vez que se tratava de resultados expressos no suco celular. Atendendo a que existem variações nos níveis de nitratos durante o dia, os autores sugerem que, nas condições da Holanda, a amostragem seja feita entre as dez da manhã e o meio dia.

Um factor a ter em conta na avaliação do estado nutritivo das plantas são as condições meteorológicas no momento da colheita do material vegetal para análise. Estas devem ser representativas da época do ano, na medida em que qualquer *stress* ambiental pode influenciar a composição mineral das plantas (Santos, 1996; Mills e Jones, 1996).

2.3.4.7- Efeitos sazonais e regionais

Os resultados da análise de plantas indicam, frequentemente, a ocorrência de diferenças no teor de nutrientes entre duas estações de crescimento (Reichman *et al.*, 1959; Mackay e Leefe, 1962; Melsted *et al.*, 1969). A existência de efeitos sazonais, em primeira análise, significa, tão só, que a disponibilidade de nutrientes não é o único factor capaz de influenciar a composição química das plantas e traduz a variabilidade interanual dos elementos meteorológicos.

A existência de efeitos regionais traduzem diferenças na disponibilidade biológica dos nutrientes no solo e também diferenças nas variáveis associadas ao clima. Em ensaios realizados em duas localidades com a cultura da batata, Vitosh e Silva (1996) registaram diferenças significativas no teor de nitratos nos pecíolos. No seu estudo avaliaram, também, a mineralização. A diferença no teor de nitratos nos pecíolos entre as duas localidades pôde ser explicada pela diferente disponibilidade natural de azoto nos solos. Rykbost *et al.* (1993) verificaram que a cv. Russet Burbank, cultivada em condições de estação de crescimento curta, apresentou valores de nitratos nos pecíolos diferentes daqueles publicados para condições culturais adequadas.

Quando se comparam duas regiões distantes, ou ecologicamente muito distintas, a composição das plantas pode variar de forma apreciável. A questão que se coloca é saber se será necessário criar normas de interpretação regionais ou se as normas uma vez estabelecidas são de utilização universal. Morales *et al.* (1993) avaliaram o estado nutritivo de vinhas na região *Lagunera* no México com as normas de interpretação de resultados publicadas nos Estados Unidos e na França. Foram registadas incongruências diversas a ponto dos investigadores concluírem que as normas de interpretação têm apenas valor regional. Failla *et al.* (1993) apresentam conclusões idênticas em estudos com macieiras no Nordeste de Itália.

A questão do valor universal das normas de interpretação de resultados é muito antiga, tendo sido já discutida por Ulrich (1943). Admitindo a universalidade das normas, o processo ficaria muito simplificado, bastando um ensaio em condições controladas para as definir. Contudo, esta metodologia nunca foi seguida. Os investigadores, normalmente, apresentam normas de interpretação de resultados baseadas em numerosos ensaios de campo, estando subjacente que aceitam que os factores que definem o potencial produtivo definem as normas dessa região.

2.3.5 – Indicadores do estado nutritivo

O conteúdo total em elementos nutrientes na matéria seca é o indicador de referência para avaliar o estado nutritivo das plantas. Os resultados são expressos em percentagem ou em g kg^{-1} para os macronutrientes e em mg kg^{-1} para os micronutrientes (Mills e Jones, 1996).

A utilização da fracção solúvel dos elementos (fracção que se dissolve em água, ácidos fracos ou agentes quelatizantes) tem-se generalizado e assumido cada vez maior protagonismo. Estudos em diversas culturas mostraram que nitratos (Ulrich, 1943; Gallo *et al.*, 1965; Hylton *et al.*, 1965; Gupta e Saxena, 1976 a), fosfatos (Ulrich, 1943; Ulrich e Berry, 1961; Gallo *et al.*, 1965; Gupta e Saxena, 1976 a) e sulfatos (Ulrich e Hylton, 1968; Islam e Ponnampuruma, 1982) podem ser melhores indicadores do estado nutritivo das plantas que a totalidade dos elementos respectivos. Alguns autores consideram haver, também, vantagens analíticas (Gallo *et al.*, 1965; Bates, 1971).

As relações entre diferentes fracções de um mesmo nutriente ou de nutrientes diferentes também têm sido utilizadas como indicadores do estado nutritivo das plantas. Freney *et al.* (1978) mostraram que a razão sulfato/enxofre total foi melhor indicador do estado nutritivo do trigo que o sulfato ou o enxofre total quando utilizados individualmente. Islam e Ponnampuruma (1982) obtiveram, também, bons resultados utilizando a razão sulfato/S total

na cultura do arroz. Rasmussen *et al.* (1977) consideraram a razão N/S melhor indicador da deficiência em enxofre no trigo que o sulfato ou o S total. Bansal *et al.* (1983) referem, também, grandes vantagens na utilização daquele indicador na cultura da soja.

A determinação do teor de nitratos generalizou-se quando se pretende apenas avaliar o estado nutritivo azotado. Os órgãos da planta eleitos são os tecidos condutores, designadamente pecíolos de folhas e caules. Em batateira, uma das poucas exceções foi protagonizada por Gupta e Saxena (1976 b). Estes autores defendem a utilização do azoto total determinado na totalidade das folhas de plantas inteiras. Tal metodologia, porém, não tem sido repetida, eventualmente por ser muito destrutiva.

Alguns autores utilizaram a taxa de decréscimo do teor de nitratos, para desta forma avaliar o estado nutritivo azotado das plantas (Carter *et al.*, 1971; Giles *et al.*, 1977; Constable *et al.*, 1991; Vitosh *et al.*, 1992; Keisling *et al.*, 1995). Com base em equações que descrevem o decréscimo da concentração de nitratos com o tempo, os autores consideram que obtêm, também, informação sobre a data provável em os nitratos descem abaixo dos níveis críticos.

Certos compostos intermédios do metabolismo, como os aminoácidos, podem ser utilizados como indicadores do estado nutritivo. Ozaki (1961) testou um método rápido de determinar a asparagina em folhas de arroz. Concluiu que o aminoácido podia ser utilizado para diagnosticar deficiências em azoto.

O diagnóstico do estado nutritivo tem envolvido também a utilização de métodos enzimáticos. Baseiam-se no princípio de que a actividade de certas enzimas reflecte o nível de nutrientes na planta. A determinação da actividade da nitrato reductase tem sido dos métodos enzimáticos o mais utilizado. É proposto como alternativa ao uso dos nitratos na avaliação do estado nutritivo azotado. Dias e Oliveira (1987) registaram uma correlação próxima entre os níveis de nitratos e a actividade da enzima em pecíolos de beterraba sacarina. Os autores consideram, ainda, que o processo analítico é mais simples. Outros investigadores tinham encontrado uma boa correlação entre a actividade da nitrato reductase e o estado nutritivo azotado das plantas (Bar-Akiva *et al.*, 1970; Kapoor e Li, 1982). A anidrase carbónica, no diagnóstico da deficiência de zinco, a fosfatase ácida para o fósforo e a catalase e a peroxidase para o ferro, se estiverem garantidos níveis adequados de manganés, são outras possibilidades de diagnóstico, recorrendo a métodos enzimáticos (Marschner, 1986; Lucena, 1994).

A possibilidade de se relacionar o teor de clorofila com o estado nutritivo azotado das plantas é conhecida desde longa data (Vos e Bom, 1993). O aparecimento, no mercado, de aparelhos portáteis que estimam, por um processo quase instantâneo e sem envolver técnicas analíticas, o teor de clorofila, tem permitido explorar aquela relação. Diversos investigadores

procuraram relacionar as estimativas produzidas pelo aparelho portátil e o estado nutritivo azotado de diversas culturas. Este assunto será desenvolvido em 2.3.7.1.2.

Alguns investigadores ensaiaram técnicas de detecção remota, por medição radiométrica, na avaliação do estado nutritivo azotado das culturas. Blackmer *et al.* (1996) utilizaram um espectroradiómetro portátil para medir a radiação reflectida. Os seus resultados produziram boas indicações, embora o estudo se tenha centrado ainda na eleição dos comprimentos de onda mais adequados. Baret e Fourty (1997) fizeram a revisão do tema. Apesar de identificarem algumas ambiguidades, destacaram as potencialidades das metodologias para complementar informação sobre o estado nutritivo azotado das culturas.

2.3.6 - Interpretação dos resultados

O sucesso da análise de plantas, enquanto técnica de diagnóstico, depende não só do processo de amostragem e das técnicas analíticas, mas também da interpretação dos resultados. Apesar dos progressos contínuos, os resultados da análise de plantas continuam a ser difíceis de interpretar e relações capazes com a produção nem sempre são fáceis de obter.

Como vimos, a composição das plantas pode variar muito sem influência visível na produção, especialmente na região de consumo de luxo. Por outro lado, a produção pode sofrer grandes alterações sem modificação sensível da composição das plantas, designadamente na região deficiente. Para dificultar a interpretação dos resultados contribui também a influência de muitos outros factores, que não a disponibilidade de nutrientes, na composição das plantas e na produção.

As propostas de interpretação de resultados da análise de plantas, com aceitação e uso generalizado, podem ser divididas em três grupos principais: (i) comparação dos valores actuais da composição das plantas com concentrações críticas ou níveis críticos; (ii) agrupamento dos resultados em classes de suficiência, por processo análogo à interpretação dos resultados da análise de terras; e (iii) aplicação do sistema integrado de diagnóstico e recomendação (*Diagnosis and Recommendation Integrated System*, DRIS). Outras propostas recentes têm incidido em refinamentos do DRIS e na análise de componentes principais.

2.3.6.1 – Concentração crítica

O conceito de concentração crítica foi originalmente introduzido por Macy (1936). O autor considera que existe uma percentagem crítica dos nutrientes em cada tipo de planta

acima da qual ocorre consumo de luxo e abaixo da qual existe uma zona de mau ajustamento até se atingir uma zona de concentrações mínimas. A forma como evoluem a concentração de nutrientes e a produção foram descritos em 2.3.3. Desde então, cada investigador tem introduzido ligeiras modificações e perspectivas individuais, mas o significado geral não tem sofrido grandes alterações.

O conceito pressupõe a definição de um simples ponto na curva que relaciona a concentração do nutriente e a produção (figura 2). Desta forma definem-se duas zonas: (i) a zona de *deficiência*; e (ii) a zona de *concentrações adequadas*. Actualmente o conceito tem um significado eminentemente estatístico. Abaixo da concentração crítica considera-se existir uma elevada probabilidade de haver resposta positiva na produção à aplicação do nutriente, enquanto acima da concentração crítica é elevada a probabilidade de não haver resposta.

Para elementos que acima de dado nível possam afectar negativamente a produção, Magnitski (1961) define a existência de um nível crítico de toxicidade. Maynard e Barker (1972) utilizaram o conceito de concentração crítica para definir o teor de nitratos nos vegetais que põem em perigo a saúde pública.

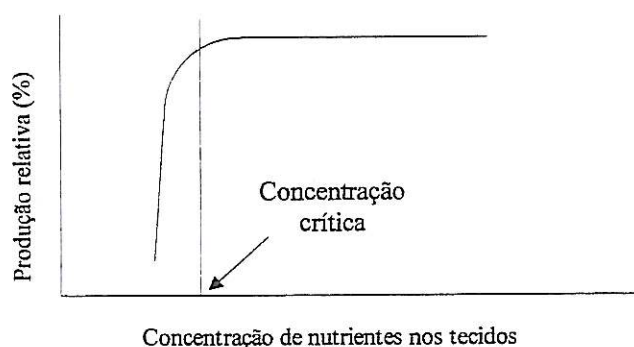


Figura 2 – Concentração crítica de nutrientes nos tecidos (adaptado de Ulrich e Hills, 1973).

As características da curva que relaciona a concentração dos nutrientes e a produção variam em função da espécie, do estado fenológico e de muitos factores ambientais com os quais a concentração crítica também varia (Scaife e Barnes, 1977). Assim, o conceito de concentração crítica pressupõe, sempre, a utilização de uma parte específica da planta e de um estado fenológico bem definido (Elwali *et al.*, 1985).

O conceito de concentração crítica, em si, pode considerar-se consensual. Contudo, tem havido pequenas divergências na forma de o pôr em prática. Alguns autores determinam a concentração crítica no ponto correspondente a 95 % da produção relativa (Reichman, 1959;

Dumenil, 1961; Gupta e Saxena, 1976 b). Outros, admitem um decréscimo de produção maior e utilizam a concentração do nutriente correspondente a 90 % da produção relativa (Ulrich e Hills, 1973; Freney *et al.*, 1978; Ware *et al.*, 1982; Baethgen e Alley, 1989). Hylton *et al.* (1964) e Gupta e Saxena (1976 a) determinaram a concentração crítica no ponto em que a derivada da função que relaciona a concentração do nutriente e a produção relativa é igual à unidade ($\delta y/\delta x = 1$). Quando os dados são ajustados pelo modelo linear descontínuo, o nível crítico fica definido no ponto de intersecção dos dois segmentos de recta (Binford *et al.*, 1990; Westcott *et al.*, 1991).

Alguns investigadores têm utilizado o método gráfico de Cate-Nelson para determinar a concentração crítica (Prasad e Ravenwood, 1986; Evanylo, 1989 b; Roth *et al.*, 1989; Porter e Sisson, 1991 a; Sims *et al.*, 1995). Cate e Nelson (1971) consideram que determinar a concentração crítica assumindo uma perda de produção fixa confere subjectividade ao processo, tornando-o dependente de cada investigador. Por outro lado, como é difícil obter boas curvas de resposta, os valores determinados para as concentrações críticas ficam muito dependentes de pontos dispersos que surjam devido a variabilidade experimental.

O método gráfico Cate-Nelson consiste em elaborar um diagrama de quatro quadrantes sobre a nuvem de pontos gerada pela relação entre a concentração de nutrientes e a produção relativa. As linhas vertical e horizontal são colocadas de forma a que figure a maior quantidade de pontos nos quadrantes positivos (II e IV) e a quantidade mínima de pontos nos quadrantes negativos (I e III) (figura 3). Procedendo desta forma, a linha vertical intercepta a abcissa no ponto correspondente à concentração crítica e separa as experiências que respondem (esquerda) das que não respondem (direita) aos fertilizantes. À linha horizontal não é atribuído significado real.

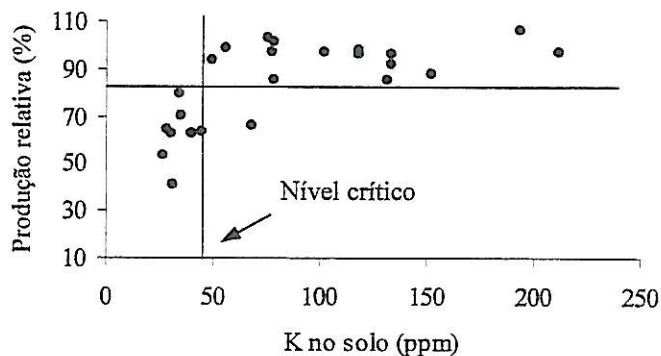


Figura 3 – Nível crítico definido pelo método gráfico (adaptado de Cate e Nelson, 1971).

Alguns investigadores utilizam o método gráfico de Cate-Nelson, mas alteram ligeiramente o procedimento. Em vez de permitirem que a linha horizontal se fixe de forma livre, posicionam-na no valor que consideram mais adequado aos seus dados. Islam e Ponnampereuma (1982) colocaram-na no valor correspondente a 80 % da produção relativa. Piekielek e Fox (1992) fixaram-na em 92 % e Piekielek *et al.* (1995) em 93 %. Desta forma, introduzem subjectividade no processo, mas evitam que, por vezes, a linha horizontal surja colocada sobre produções relativas muito baixas. Embora pela técnica Cate-Nelson não seja atribuído significado real à linha horizontal, fica no ar a ideia de que se aceita uma perda de produção muito elevada. Evanylo (1989 b), por exemplo, ao definir níveis críticos para o azoto em folhas de batateira, apresenta a linha horizontal colocada no valor correspondente a 70 % da produção relativa.

Cate e Nelson (1971) apresentam, também, uma forma analítica de se determinar o nível crítico. Ordenam-se os dados da concentração do nutriente por ordem crescente e dividem-se em duas subpopulações. São criadas todas as divisões possíveis desde dois dados na primeira subpopulação e os restantes na segunda até à situação inversa. É calculada a soma dos quadrados dos desvios de todos os conjuntos de subpopulações criadas e do total das observações. Define-se o nível crítico na divisão entre as duas subpopulações a que corresponde o maior r^2 obtido pela expressão

$$r^2 = (SQD_t - (SQD_1 + SQD_2)) / SQD_t,$$

em que SQD_1 , SQD_2 e SQD_t representam a soma dos quadrados dos desvios das subpopulações 1 e 2 e do total de observações, respectivamente. Nelson e Anderson (1977) consideram que o método analítico é mais sensível a pontos dispersos, mas que os resultados obtidos são, normalmente, muito próximos dos do método gráfico.

2.3.6.2 - Classes de suficiência

Kenworthy (1949) propôs a divisão da curva de resposta que relaciona a concentração de nutrientes na planta e a produção em cinco regiões, de forma semelhante à técnica usada para separar a disponibilidade de nutrientes no solo. Foi também atribuído significado fisiológico a cada região. A proposta de classificação da concentração de nutrientes na planta e a interpretação fisiológica de Kenworthy (1949) foi a seguinte:

muito baixa – concentração do nutriente para a qual aparecem sintomas visíveis de deficiência;

baixa – a produção pode estar a ser comprometida, mas não aparecem sintomas visíveis de deficiência. É a zona designada de carências ocultas ou dissimuladas;

suficiente – corresponde à região de concentrações adequadas. A aplicação de mais nutriente não origina aumentos de produção;

alta – os níveis do nutriente são mais elevados que o necessário à obtenção da produção ótima. Corresponde à região de consumo de luxo;

muito alta – a produção relativa pode ser inferior a 100 % devido a um desequilíbrio no balanço entre nutrientes. Podem ocorrer sintomas de toxicidade visíveis.

Esta forma de apresentar os resultados foi posteriormente adoptada por outros investigadores (Chapman, 1961; Dow e Roberts, 1982; Maier *et al.*, 1987; Walworth e Muniz, 1993; Fontes *et al.*, 1996).

Whitney *et al.* (1985) sugeriram que fosse estabelecida uma relação quantitativa entre os intervalos de suficiência e a produção relativa. As correspondências propostas entre as classes de Kenworthy e a produção relativa (entre parêntesis) são as seguintes: muito baixa (< 80 %); baixa (80 a 90 %); suficiente (90 a 100 %); alta (100 %); e muito alta (< 100 %). Outros investigadores adoptaram a ideia de Whitney *et al.* (1985), mas definiram relações quantitativas substancialmente diferentes (Maier *et al.*, 1987; Fontes *et al.*, 1996).

A divisão em cinco classes não tem sido consensual. Olson e Kurtz (1982) defendem a utilização de apenas quatro classes: deficiente, baixa, suficiente e excessiva. Intrigliolo *et al.* (1993) interpretaram os seus resultados mediante esta divisão. Bould (1961) considera que, do ponto de vista da fisiologia da planta, só faz sentido falar em três classes: deficiente, marginal, e suficiente.

Do ponto de vista teórico, as classes de suficiência dão mais informação que a concentração crítica. Para além de indicarem que o nutriente está abaixo do nível ótimo, sugerem também o grau de deficiência ou o grau de desajustamento do programa de fertilização seguido. De qualquer forma, as classes de suficiência nunca tiveram o êxito da concentração crítica, a julgar pelo restrito número de aderentes. As suas limitações são idênticas e cada separação entre classes não é mais que um valor crítico, estando, por isso, sujeitas aos mesmos factores de variação e às mesmas dificuldades de interpretação. Na prática, também nunca foram demonstrado vantagens na quantificação do fertilizante a aplicar.

A versão das três classes de suficiência viria a ser adoptada com o sentido idêntico ao da concentração crítica. Alguns investigadores consideram haver vantagens em definir uma região e não apenas um ponto para a concentração crítica. O conceito aparece com a

designação de intervalo de concentração crítica (Gardner e Jones, 1975; Roberts e Cheng, 1988; Errebhi *et al.*, 1998). A utilidade prática é questionável e os investigadores que interpretaram os resultados por este processo nunca esclareceram o que fazer quando a concentração dos nutrientes se posiciona dentro do intervalo de concentração crítica, isto é, nunca esclarecem se se torna necessária, ou não, a fertilização.

2.3.6.3 - Sistema integrado de diagnóstico e recomendação

A interpretação dos resultados pela concentração crítica, intervalo de concentração crítica ou classes de suficiência é proposta para elementos isolados ou para as suas fracções. O sistema integrado de diagnóstico e recomendação, desenvolvido nos anos setenta por Beaufils na África do Sul, permite uma análise simultânea a vários elementos. O autor pretendia integrar os resultados da análise de terra e toda a informação disponível sobre as condições de desenvolvimento das plantas; daí a designação de sistema integrado de diagnóstico e recomendação. Contudo, o DRIS foi sempre visto como uma forma de interpretar os resultados da análise de plantas (Black, 1993).

A forma como o sistema é implementado foi revista por diversos investigadores (Sumner, 1977 b, 1978; Meldal-Johnsen e Sumner, 1980; Escano *et al.* 1981; Walworth *et al.* 1986 a,b; Walworth e Sumner, 1987; Black, 1993). Consiste, basicamente, nas seguintes etapas: (i) estabelecimento das normas DRIS; (ii) cálculo dos índices DRIS; e (iii) interpretação dos resultados.

Estabelecimento das normas DRIS – para o estabelecimento das normas utilizam-se todos os resultados disponíveis que relacionem a composição das plantas com a produção. Para os resultados aderirem à distribuição normal são divididos em duas subpopulações: a subpopulação das produções elevadas, que deve ficar com apenas 10 % dos dados; e a subpopulação das produções inferiores, que fica com os dados restantes. Cada elemento a incluir no diagnóstico é expresso num número variado de formas. Por exemplo, % N na matéria seca, N/K, P.K, N+P, etc.. A média de cada expressão e a sua variância são calculadas para cada uma das subpopulações. A expressão escolhida é aquela cuja razão entre variâncias seja significativamente diferente e melhor discriminar entre as duas subpopulações. A média dessa expressão é a norma.

Cálculo dos índices DRIS – para gerar os índices, são utilizados o valor da norma e os resultados actuais da análise. As equações propostas para hipotéticos nutrientes de A a N são as seguintes:

$$\text{índice A} = \frac{[f(A/B) + f(A/C) + f(A/D) \dots + f(A/N)]}{z}$$

$$\text{índice B} = \frac{[-f(A/B) + f(B/C) + f(B/D) \dots + f(B/N)]}{z}$$

$$\text{índice N} = \frac{[-f(A/B) - f(B/N) - f(C/N) \dots - f(M/N)]}{z}$$

em que, se $A/B \geq a/b$

$$f(A/B) = 10 \left(\frac{A/B}{a/b} - 1 \right) \frac{100}{CV}$$

ou, se $A/B < a/b$

$$f(A/B) = 10 \left(1 - \frac{a/b}{A/B} \right) \frac{100}{CV}$$

em que: A/B é a razão entre os valores da concentração dos nutrientes em diagnóstico nos tecidos; a/b é o valor da norma para a razão entre os nutrientes; CV é o coeficiente de variação associado à norma; e z é o número de funções em que o nutriente intervém. Os valores para as restantes funções $f(A/C)$, $f(A/D)$, etc., são calculados da mesma forma. O factor 100 é introduzido porque o desvio padrão é multiplicado por 100/média para obter o coeficiente de variação e 10 é um valor arbitrário para que o resultado final surja com valores de dimensão conveniente para efeitos práticos. Os índices calculados desta forma incluem todas as funções que contêm o nutriente em questão.

Interpretação dos resultados – a técnica ordena os índices dos nutrientes por ordem de deficiência, tomando cada um valor negativo, nulo ou positivo. O facto do índice ter valor positivo ou negativo não significa que o nutriente está em excesso ou deficiência, respectivamente. A interpretação é feita em termos relativos. Por exemplo, um índice 7 -22 15 (N P K) indica apenas que, dos três nutrientes, o mais limitante é o fósforo. Aplicando fósforo é de esperar um aumento de produção. O índice correspondente ao azoto, só por ser positivo, não deve ser entendido como estando em excesso. O resultado significa apenas que o azoto é o segundo elemento mais deficiente, a seguir ao fósforo. A soma de todos os índices, em valor absoluto, deve ser baixa (no limite igual a zero). Uma soma elevada indica um grande desequilíbrio entre os nutrientes.

A utilização do DRIS generalizou-se nos fins dos anos setenta e nos anos oitenta. Foram estabelecidas normas DRIS para os nutrientes mais importantes, incluindo micronutrientes, para um número variado de culturas, como a soja (Sumner, 1977 b), a batateira (Meldal-Johnsen e Sumner, 1980; Mackay *et al.*, 1987), o milho (Escano *et al.*, 1981; Elwali *et al.*, 1985), a cana do açúcar (Jones e Bowen, 1981; Elwali e Gascho, 1983,1984), o girassol (Grove e Sumner, 1982), a laranjeira (Beverly *et al.*, 1984; Malavolta *et al.*, 1993), a luzerna (Walworth *et al.*, 1986 b), a macieira (Goh e Malakouti, 1992) e o milho e o sorgo (Jones *et al.*, 1990).

Alguns investigadores compararam a qualidade do diagnóstico do DRIS relativamente aos métodos clássicos. Jones e Bowen (1981) verificaram que o DRIS permitiu melhorar o diagnóstico em 5 % das situações, devido à menor sensibilidade à idade dos tecidos, posição das folhas e cultivares. Elwali e Gascho (1984) mostraram, também, haver algumas vantagens do DRIS relativamente à concentração crítica na correcção de desequilíbrios nutritivos na cana de açúcar.

Dado tratar-se de uma técnica de interpretação mais trabalhosa e necessitar grande volume de informação para ser implementada, é pertinente questionar-se a universalidade das normas DRIS. Walworth *et al.* (1986 b) calcularam as normas para a luzerna com base em resultados separados do Sul e do Oeste dos Estados Unidos. Os autores identificaram diferenças significativas nalguns nutrientes e assumiram haver uma certa regionalidade nas normas. Escano *et al.* (1981) verificaram que quer o DRIS quer os sistemas clássicos dão melhores resultados na cultura do milho se forem calibrados para cada local. Mackay *et al.* (1987) determinaram as normas DRIS em batateira para duas regiões do Canadá: uma região semiárida (Alberta) com cultura de regadio; e uma região temperada húmida (Nova Escócia) em sequeiro. As diferenças encontradas foram apenas pontuais. Contudo, verificaram que as normas publicadas para a África do Sul se revelaram verdadeiramente insatisfatórias para diagnosticar em ambas as regiões do Canadá. Também Dara *et al.* (1992) encontraram vantagens na utilização de normas locais relativamente às normas padrão na cultura do milho.

Outra limitação importante surge quando se incluem vários elementos para além de N, P e K. Black (1993) cita trabalhos em que a presença de um micronutriente em níveis elevados fez com que todos os índices dos macronutrientes tivessem valores muito negativos, tornando-se difícil interpretar o resultado.

Apesar das aparentes potencialidades do DRIS, não tem havido uma aderência elevada por parte dos técnicos dos laboratórios responsáveis pela recomendação de fertilização. Segundo Mills e Jones (1996), a fraca aderência é atribuída a: (i) pouca familiaridade com o

sistema; (ii) dificuldades em se obterem normas regionais, devido à necessidade de grande quantidade de informação, sobretudo para micronutrientes; e (iii) falta de informação relativa ao DRIS sobre verificação de campo, calibração e recomendação.

O DRIS não é um sistema adequado como base de recomendação de fertilização de cobertura para as culturas anuais. Para além de não quantificar o nutriente a aplicar apresenta outras limitações importantes. Por exemplo, Sumner (1977 b) apresenta, com aparente sucesso, as potencialidades dos DRIS da seguinte forma: para um resultado de 7 –22 15 (N P K), na modalidade testemunha, verificou-se que aplicando fósforo havia resposta na produção. Continuando a aplicar sucessivamente o elemento mais limitante (possível através de uma experiência factorial com vários níveis dos três nutrientes) foi havendo resposta na produção até se atingir a fertilização de 200, 100 e 60 kg ha⁻¹ de N, P e K, respectivamente. Contudo, na prática, não era possível, com base no resultado inicial 7 –22 15, imaginar-se que as melhores doses seriam as anteriormente referidas. Em culturas perenes, o DRIS funciona bem porque o balanço de nutriente vai sendo acertado ao longo dos anos. Para as culturas anuais o sistema pode ser útil para aferir a qualidade dos programas de fertilização em curso, mas não como base de recomendação de fertilização.

2.3.6.4 – Outras propostas de interpretação de resultados

Alguns investigadores têm utilizado versões modificadas do DRIS, designadamente pela inclusão da matéria seca nas equações (Halmark *et al.*, 1990; Bell *et al.*, 1995). Incluindo um índice para a matéria seca, evita-se a obtenção de uma soma muito baixa dos índices (aparente equilíbrio) quando todos os nutrientes considerados no diagnóstico estão baixos e a planta pouco desenvolvida (Black, 1993). Este sistema tem sido designado de M-DRIS.

Parent e Dafir (1992) e Parent *et al.* (1994 a,b) interpretaram os resultados da análise de plantas por um processo que designam de *Compositional Nutrient Diagnosis* (CND) e que consiste num exercício matemático que usa transformações logarítmicas de razões multielemento e se torna compatível com a análise de componentes principais. Consideram que o sistema pode melhorar o diagnóstico relativamente aos sistemas que utilizam apenas uma variável (níveis críticos) e aos sistemas com duas variáveis (DRIS). Desta forma, esperam que os resultados reflectam todo o tipo de interações entre nutrientes. Recentemente, Raghupathi e Bhargava (1998) verificaram haver uma boa relação entre os índices DRIS e a CND, em estudos sobre o estado nutritivo de romãzeira.

Apesar da opinião favorável dos proponentes, parece-nos que a informação disponível ainda não permite concluir das vantagens reais dos novos métodos de interpretação propostos.

2.3.7 - Recomendação da fertilização

A recomendação de fertilização com base nos resultados da análise de plantas, obtida pelos métodos laboratoriais clássicos, surge como uma técnica de diagnóstico *post mortem* para as culturas anuais. Isto significa que os resultados são utilizados para aferir programas de fertilização, normalmente baseados em análises de terras, e com isso melhorar a recomendação para os anos seguintes, mas não são utilizados para sugerir intervenções no próprio ano. As fases avançadas do ciclo em que normalmente se preconiza a colheita das amostras, associadas ao tempo que decorre desde a colheita até à obtenção do diagnóstico e correspondente sugestão de intervenção, torna impraticável assentar o programa de fertilização na análise de plantas.

Este panorama tem sido alterado com a generalização dos testes rápidos de tecidos. Embora a utilização dos métodos expeditos não seja recente tem ganho muita importância nos últimos anos e dado nova dinâmica à utilização da análise de plantas como técnica de diagnóstico. Cada vez mais os métodos expeditos são um complemento indispensável nos programas de fertilização. Permitem que se façam coberturas cirúrgicas promovendo de forma decisiva a eficiência de uso dos nutrientes.

2.3.7.1 - Testes rápidos de tecidos

Os testes rápidos de tecidos produzem resultados fáceis de interpretar e com recurso a equipamento de baixo custo. Não é, contudo, seu objectivo substituir as técnicas laboratoriais, mas sim obter, em situações concretas, determinado tipo de informação que as técnicas laboratoriais não podem fornecer.

Os testes rápidos de utilização mais generalizada são, sem dúvida, os que se propõem avaliar o estado nutritivo azotado, devido às dificuldades em fazer recomendações deste nutriente e à eficiência com que pode ser aplicado em cobertura. As propostas de actuação consistem na aplicação de quantidades moderadas de azoto em fundo, não mais de um terço a metade do azoto recomendado pela análise de terras, para garantir um bom desenvolvimento inicial da cultura (Ojala *et al.*, 1990). Durante o ciclo cultural são feitos os ajustamentos necessários, com aplicações de cobertura, atendendo aos resultados dos testes rápidos de

tecidos (Porter e Sisson, 1991 a; Singh, 1993; Justes *et al.*, 1994). Desta forma, reduz-se o potencial de perdas de azoto decorrentes da aplicação de doses elevadas numa fase em que as plantas ainda não estão presentes ou não têm o desenvolvimento suficiente para absorver grandes quantidades de nutriente. Este aspecto tem particular importância em culturas de sistema radicular pouco desenvolvido, como a batateira (Vitosh e Silva, 1996).

Os testes rápidos permitem que se diagnostique, logo no início da estação de crescimento (Singh, 1993), conduzindo a uma intervenção atempada que permita uma utilização eficiente do nutriente. Este aspecto é decisivo porque, embora algumas culturas, como a batateira, continuem a absorver azoto em fases avançadas do ciclo (Greenwood *et al.*, 1985 a; Ojala *et al.*, 1990), a absorção é máxima entre 40 a 60 dias após emergência (DAE) (Asfary *et al.*, 1983) e em cultivares de ciclo curto, como a cv. Bintje, pouco mais azoto é absorvido a partir de 50 DAE (Gargantini *et al.*, 1963).

Alguns autores têm sugerido métodos de quantificar o nutriente a aplicar com base nos indicadores do estado nutritivo (Baethgen e alley, 1989; Singh, 1993; Piekielek *et al.*, 1995), embora a própria quantificação do fertilizante passe a ser um problema menor, devido à facilidade com que os testes podem ser repetidos durante a estação de crescimento. Quando se tem instalado um sistema de fertirrigação, pode adoptar-se um esquema de fertilização multifracionada, com reconhecidas potencialidades na melhoria da eficiência de uso do azoto. Desta forma, só se utilizam as quantidades iminentemente necessárias, evitando-se aplicações excessivas ou penalizando-se as produções com doses insuficientes.

Os testes rápidos, que actualmente mais se utilizam para avaliar o estado nutritivo azotado das culturas, consistem na determinação do teor de nitratos e na estimativa do teor de clorofila.

2.3.7.1.1 - Avaliação do teor de nitratos

Os nitratos são uma fracção de azoto não metabolizada. Quando as necessidades básicas das plantas estão satisfeitas, acumulam-se como forma de reserva. No trigo podem chegar a representar metade do azoto em excesso (Zhen e Leigh, 1990; Barraclough, 1993). Assim, escolhendo o tecido certo da planta, podem reflectir, em cada momento, a forma como o azoto que está a ser absorvido. Em diversos estudos foi também demonstrado que a variação na concentração de nitratos nos tecidos pode ser correlacionada com a produção (Gardner e Jones, 1975; Gupta e Saxena, 1976 a; Roberts e Cheng, 1988; Porter e Sisson, 1991 a; Singh, 1993; Westcott *et al.*, 1993).

A determinação do teor de nitratos por métodos expeditos pode envolver a utilização de *eléctrodos específicos para nitratos* ou o uso de *tiras de teste* que desenvolvem uma cor vermelho/violeta quando imersas numa solução que contenha nitratos, sendo a intensidade da cor proporcional ao teor de nitratos em solução. A correspondência entre a cor das tiras e a concentração de nitratos em solução pode ser feita por observação visual ou utilizando reflectómetros portáteis.

A determinação do teor de nitratos por potenciometria, utilizando eléctrodos específicos, tem dado resultados satisfatórios. Vitosh e Silva (1994) utilizaram um aparelho portátil designado HACH One pH/ISE[®], fazendo a determinação sobre o suco celular espremido directamente de pecíolos de batateiras. A correlação com os resultados obtidos por determinação laboratorial envolvendo a secagem e moenda das amostras foi bastante elevada ($r = 0,91$). Errebhi *et al.* (1998) obtiveram resultados semelhantes ($r = 0,92$) com o mesmo tipo de equipamento e em estudos sobre a mesma cultura. Westcott *et al.* (1993) utilizaram um aparelho designado de Cardy[®] na cultura da batata. Obtiveram correlações altamente significativas ($r = 0,96$ em 1990 e $r = 0,97$ em 1991) quando os resultados foram comparados com a determinação laboratorial também por potenciometria, usando o eléctrodo específico para nitratos Orion[®]. Westcott *et al.* (1998) utilizaram o Cardy[®] na determinação de níveis tóxicos de nitratos em forragens para animais. A correlação com o método laboratorial foi também elevada ($r = 0,93$).

A utilização de tiras de teste com observação visual do desenvolvimento de cor é também um importante método expedito de análise. Os resultados são interpretados através de cartas de cores para as quais existe uma correspondência em concentração de nitratos em solução. Bischoff *et al.* (1996) compararam os resultados obtidos por um painel de observadores sobre tiras Merckoquant[®] com os resultados de um método laboratorial de análise. Os resultados não diferiram significativamente ($\alpha < 0,05$). Outros investigadores obtiveram boas correlações entre a análise visual das tiras e os resultados de métodos laboratoriais, quando as leituras incidiram sobre soluções padrão de concentração conhecida (Scaife *et al.*, 1983) ou sobre extractos obtidos a partir de plantas (Loon *et al.*, 1987; Papastylianou, 1989; Castillon *et al.*, 1994). Prasad e Ravenwood (1986) verificaram existir uma boa correlação entre os resultados obtidos por observação visual das tiras e o crescimento de jovens plantas de kiwi.

Atendendo à elevada concentração de nitratos no suco celular de algumas plantas, Papastylianou (1989) propôs que a interpretação fosse feita com base na rapidez com que as

tiras mudam de cor. O autor verificou que o tempo que as tiras demoram a atingir a coloração máxima é directamente proporcional ao teor de nitratos no extracto.

O aparecimento no mercado de reflectómetros portáteis permitiu transformar os resultados semiquantitativos, obtidos pela análise visual, em resultados quantitativos. Os reflectómetros medem a quantidade de luz reflectida pelas tiras de teste e fazem a conversão da reflectância em teor de nitratos na solução (Jemison e Fox, 1988).

Schaefer (1986) utilizou um aparelho portátil designado Easytest Mkl[®], que utiliza tiras Merckoquant[®]. Com este aparelho, o autor conseguiu melhorar, em quatro vezes, a previsão relativamente à observação visual das tiras. Após uma transformação hiperbólica conseguiu relações lineares com coeficientes de determinação de 0,99, 0,97 e 0,92 sobre uma solução padrão de nitrato de cálcio, extractos de solos e extractos de plantas, respectivamente.

Jemison e Fox (1988) usaram um reflectómetro portátil designado Nitrachek[®], que também utiliza tiras de teste Merckoquant[®], para determinar o teor de nitratos em caules de milho e em extractos de terras. Com este aparelho obtiveram relações lineares com os resultados dos métodos laboratoriais de análise. As correlações obtidas foram de $r = 0,87$ e $r = 0,98$ para os extractos de plantas e de terras, respectivamente. Nitsch e Varis (1991) utilizaram o Nitrachek[®] para estudar a evolução dos níveis de nitratos nos pecíolos da batateira e o efeito da fertilização azotada na acumulação de nitratos nos tubérculos. Os autores consideraram os resultados obtidos satisfatórios.

Actualmente encontra-se no mercado um reflectómetro portátil designado RQflex[®], que utiliza tiras de teste Reflectoquant[®]. Rodrigues *et al.* (1998 a) obtiveram uma relação linear ($r^2 = 0,99$) entre os resultados do aparelho e a concentração de nitratos numa solução padrão de nitrato de potássio. O coeficiente de determinação entre os resultados do aparelho obtidos sobre um extracto de pecíolos de batateira frescos e os resultados de um método laboratorial de análise em que se utilizam pecíolos secos na preparação dos extractos foi igual a 0,93.

Sims *et al.* (1995) compararam os resultados de equipamentos portáteis que funcionam por potenciometria (Cardy[®]) e por espectrofotometria (Nitrachek[®]) sobre extractos de terras. A correlação com os resultados de um método laboratorial de análise foi bastante melhor com o reflectómetro ($r^2 = 0,87$) que com o eléctrodo específico para nitratos ($r^2 = 0,60$).

A interpretação dos resultados dos testes rápidos aos nitratos faz-se, normalmente, por comparação dos resultados actuais com concentrações críticas previamente estabelecidas. Quando não existem normas locais podem usar-se os valores padrão tabeladas para outras regiões. Contudo, como as normas não têm carácter universal, a intenção consiste em se

construir continuamente uma base de dados que permita ajustar os níveis críticos às condições ecológicas e culturais definidoras do potencial produtivo da cada região.

As principais limitações dos métodos expeditos de análise são comuns aos métodos laboratoriais. As grandes dificuldades estão relacionadas com a variabilidade no teor de nitratos nas plantas. Resultados úteis só se obtêm se os processos de colheita e preparação das amostras, bem como a interpretação dos resultados, forem os mais adequados. Rodrigues (1997) revê os aspectos que a normalização deve incluir. Alguns dos mais importantes relacionam-se com a data de amostragem, a exclusão de plantas atípicas, o tipo de tecido mais adequado, a dimensão da amostra e, eventualmente, qual a melhor hora do dia para amostrar.

2.3.7.1.2 - Avaliação do teor de clorofila

Os pigmentos fotossintéticos, responsáveis pela cor verde das plantas, não existem isolados nos cloroplastos. Estão associados a proteínas, com as quais formam estruturas complexas, onde se encontra a maior parte do azoto das células (Lopez-Cantarero *et al.*, 1994). Desta forma, existe uma estreita relação entre o teor de clorofila e o azoto proteico. A redução das taxas fotossintéticas pode ser uma consequência directa da deficiência de azoto, por redução do teor de clorofila (Mehouachi e Lemeur, 1993).

A possibilidade de se usar o teor de clorofila como indicador do estado nutritivo azotado das plantas terá sido ensaiada há já muitos anos no Japão (Vos e Bom, 1993). Nos últimos anos, essa possibilidade tem sido muito investigada nos Estados Unidos e na Europa, motivada pelo aparecimento de aparelhos portáteis que estimam de uma forma simples e rápida o teor de clorofila.

O teor de clorofila responde à disponibilidade de azoto no solo. Lopez-Cantarero *et al.* (1994) registaram aumentos significativos nos teores de clorofila a, b e total (a + b) nas folhas de beringela (*Solanum melongena*, cv. Bonica) com o aumento das doses de azoto. Os resultados foram independentes dos níveis de fósforo. Costa (1991) obteve resultados idênticos na cultura do milho.

Shadchina e Dmitrieva (1995) consideram que o teor de clorofila é um indicador mais estável que o teor de azoto nas folhas. Em ensaios na cultura de trigo, os investigadores encontraram uma estreita relação do teor de clorofila nas folhas com o azoto total e com a matéria seca total nas plantas. Com o teor de azoto nas folhas (o indicador concorrente) não foi possível obter relações satisfatórias com azoto total e com a matéria seca.

A grande limitação do uso da clorofila como indicador do estado nutritivo azotado deve-se às dificuldades práticas associadas à colheita de material vegetal e ao processo de determinação laboratorial. O aparecimento no mercado de um aparelho portátil que, de uma forma simples e rápida, estima o teor de clorofila nos tecidos foi decisiva para a importância atribuída actualmente a este indicador. O aparelho designa-se SPAD-502[®] e foi desenvolvido pela Minolta em 1987. O SPAD-502[®] mede a transmitância da luz através da folha, fornecendo indicação numérica da intensidade da cor verde (Blackmer e Schepers, 1994; Waskom *et al.*, 1996; Fotyma *et al.*, 1998). As leituras são feitas por um processo não destrutivo, directamente sobre as plantas em campo. A demora restringe-se, praticamente, à selecção, pelo operador, da parte da planta a analisar (Vos e Bom, 1993).

Os estudos com o SPAD-502[®] têm estado, em grande parte, associados à cultura do milho, designadamente nos Estados Unidos (Piekielek e Fox, 1992; Schepers *et al.*, 1992; Blackmer e Schepers, 1994; Smeal e Zhang, 1994; Piekielek *et al.*, 1995; Waskom *et al.*, 1996), embora o aparelho tenha sido já ensaiado em culturas como o trigo (Follett *et al.*, 1992; Fox *et al.*, 1994; Fotyma *et al.*, 1998), o arroz (Turner e Jund, 1991; Peng *et al.* 1994, 1995), a batateira (Vos e Bom, 1993; Minotti *et al.*, 1994), a hortelã-pimenta (Westcott e Wraith, 1995) e a festuca alta (Kantety *et al.*, 1996).

A relação dos valores SPAD com o teor de clorofila determinado por métodos laboratoriais foi estudado por Vos e Bom (1993) na cultura da batata, cv. Vebeca. Os investigadores encontraram uma correlação linear ($r = 0,97$) entre os valores SPAD e medições analíticas do teor de clorofila. Resultados idênticos ($r^2 = 0,95$) foram obtidos por Kantety *et al.* (1996) em festuca alta.

A relação dos valores SPAD com outros indicadores clássicos do estado nutritivo azotado, como o teor de azoto total e o teor de nitratos nos tecidos, tem sido frequentemente objecto de estudo. Fox *et al.* (1994) encontraram uma relação linear altamente significativa ($r^2 = 0,70$) entre os valores SPAD e a percentagem de azoto total nas folhas na cultura do trigo. Na cultura da batata, Vos e Bom (1993) obtiveram um ajustamento linear entre os dois indicadores do estado nutritivo com um coeficiente de determinação ainda mais elevado ($r^2 = 0,95$). A relação dos valores SPAD com o teor de nitratos nos tecidos parece ser mais difícil de estabelecer. Vos e Bom (1993) encontraram relações lineares significativas ($r = 0,92$) entre os dois indicadores na cultura da batata quando todo o azoto foi aplicado em fundo. Após aplicações de cobertura, a linearidade da relação não se manteve, porque a resposta do teor de nitratos foi manifestamente mais elevada que a do teor de clorofila. Westcott e Wraith (1995) estudaram a relação entre os valores SPAD e o teor de nitratos nos caules e pecíolos de

hortelã-pimenta. Ajustaram os dados pelo modelo linear descontínuo. O resultado demonstra que as estimativas do teor de clorofila atingem, facilmente, o seu máximo enquanto os nitratos se continuam a acumular.

A interpretação dos resultados pode ser feita através do estabelecimento de valores críticos, tal como para os outros indicadores. A principal limitação da metodologia prende-se com as variações na tonalidade das plantas devido a factores ambientais, práticas culturais, doenças e, sobretudo, a diferenças entre cultivares. (Follett *et al.*, 1992; Schepers *et al.*, 1992; Blackmer *et al.*, 1993; Minotti *et al.*, 1994; Vitosh e Silva, 1994; Castillon, 1998; Fotyma *et al.*, 1998). Para ultrapassar a variabilidade na tonalidade das folhas associada aos diferentes híbridos, locais ou práticas culturais, Schepers *et al.* (1992) propõem que em vez de valores SPAD críticos absolutos se determinem SPAD críticos relativos. A técnica consiste no cálculo de um índice de suficiência (IS) obtido pela expressão

$$IS = (\text{valores SPAD de campo})/(\text{valores SPAD da faixa de referência}).$$

As faixas de referência são microparcelas localizadas na folha de cultura e onde se aplicam, propositadamente para o efeito, quantidades abundantes ou mesmo excessivas de azoto. Em ensaios de fertilização, a faixa de referência é a modalidade mais fertilizada. A técnica é possível porque o teor de clorofila não responde ao consumo de luxo, ou seja; não aumenta continuamente com a dose de azoto (Blackmer e Schepers, 1994; Westcott e Wraith, 1995; Waskom *et al.*, 1996).

Por este processo, a interpretação fica facilitada porque se pode utilizar como índice de suficiência crítico o valor de 95 %. Contudo, obriga a que todos os anos, sem excepção, se constitua uma faixa de referência, se possível por cultivar. Blackmer e Schepers (1994) e Waskom *et al.* (1996) obtiveram relações lineares significativas ($r^2 = 0,88$ e $r^2 = 0,63$, respectivamente) entre o índice de suficiência e a produção. Verificaram, também, que o índice de suficiência crítico de 95 % foi adequado para separar locais que respondem e não respondem à fertilização.

A utilização de um índice de suficiência crítico fixo é discutível, por ser um processo subjectivo e arbitrário. Piekielek *et al.* (1995) preferem definir valores SPAD relativos críticos pelo método gráfico de Cate-Nelson, utilizando a relação entre os valores SPAD relativos (valores obtidos pela formula do índice de suficiência) e a produção relativa. Desta forma, pretenderam reunir as vantagens estatísticas da técnica Cate-Nelson e as da utilização de valores SPAD relativos.

Na cultura do milho, Piekielek *et al.* (1995) estudaram a melhor forma de interpretar os resultados comparando os valores SPAD críticos absolutos com os valores SPAD críticos relativos definidos pelo método gráfico Cate-Nelson. Com a utilização dos valores absolutos, conseguiram 93 % de previsões correctas na separação dos locais que respondem e não respondem ao azoto, usando um valor SPAD crítico de 52 unidades. Normalizando os resultados para valores SPAD relativos, só conseguiram 92 % de previsões certas, com um valor SPAD relativo crítico definido em 0,93. Fox *et al.* (1994) compararam também a qualidade do diagnóstico utilizando valores SPAD absolutos e relativos em trigo. O resultado foi idêntico, tendo-se obtido 4 % de estimativas erradas pelos dois processos. Estes resultados, aparentemente, põem em causa a utilidade da determinação do índice de suficiência. Provavelmente, as vantagens da normalização dos resultados aparecem apenas quando se utilizem cultivares diferentes ou em estudos que envolvam regiões muito heterogêneas.

2.4 - Fertilização azotada da batateira

O azoto apresenta particularidades únicas no domínio da fertilização, comparativamente aos restantes elementos nutrientes. Atendendo à sua dinâmica no sistema solo/planta, tem de ser aplicado, praticamente sem excepção, em todas as estações de crescimento. A sua importância para o desenvolvimento das plantas obriga, normalmente, à aplicação de quantidades elevadas. Assim, segundo Harris (1992), é sem surpresa que o azoto aparece relacionado com grande parte dos estudos de fertilização da batateira.

2.4.1 – Absorção e assimilação de azoto

As plantas diferem na sua estratégia para a absorção de azoto. As leguminosas podem viver exclusivamente de N_2 , enquanto a maioria das plantas utilizam as formas NO_3^- e/ou NH_4^+ (Franco e Munns, 1982).

As raízes são o órgão aceite de absorção de nutrientes, embora se tenha demonstrado que diversos elementos podem entrar nas plantas pelos órgãos aéreos (Tuckey *et al.*, 1958). A possibilidade das plantas absorverem nutrientes através da parte aérea permitiu desenvolver uma técnica de fertilização designada de adubação foliar. O azoto é um dos nutrientes que pode ser veiculado com eficiência por este processo (Santos, 1996).

A absorção de nitratos pela raiz ocorre por transporte activo e passivo (Franco e Munns, 1982; Mills e Jones, 1996). O transporte activo é induzido pela presença de nitratos no meio (Franco e Munns, 1982). O processo de absorção do NH_4^+ é, praticamente, desconhecido (Gárate, 1994; Mills e Jones, 1996).

Diversos investigadores têm procurado encontrar a melhor combinação entre NO_3^- e NH_4^+ na absorção e assimilação de azoto pelas diversas espécies cultivadas. Tem-se verificado que a absorção em maior proporção de uma ou outra forma de azoto depende de aspectos genéticos, como a espécie e as cultivares (Gashaw e Mugwira, 1981; Smiciklas e Below, 1992), mas também de factores ambientais como a temperatura (Clarckson e Warner, 1979) e o pH do meio (Polizotto *et al.*, 1975; Cao e Tibbitts, 1993, 1994). A idade da planta também tem influência. As plantas jovens, com maiores limitações energéticas, parece tirarem vantagens da presença de NH_4^+ (Barber *et al.*, 1992).

Cao e Tibbitts (1993, 1994) estudaram a melhor combinação $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ em batateiras e a sua relação com o pH do meio em soluções nutritivas sem reciclagem de nutrientes. As plantas desenvolveram-se na presença isolada de NO_3^- e NH_4^+ numa gama de pH entre 5,5 e 7,5. Contudo, com qualquer das formas isoladas houve uma redução de crescimento relativamente à presença das duas formas de azoto. Por outro lado, enquanto que, com as formas isoladas, os picos de crescimento se atingiram para valores de pH bem definidos (5 e 6 para NO_3^- e NH_4^+ , respectivamente), com a mistura o crescimento manteve-se no mesmo nível para uma gama de pH alargada entre 4,5 e 7. O uso exclusivo de NO_3^- , com o meio a pH 7, originou plantas com sintomas de carência de azoto. Quando foi utilizada apenas a forma amoniacal, as plantas apresentaram sintomas de toxicidade. Comparativamente, o uso isolado de NH_4^+ foi mais penalizador para a produção que o de NO_3^- . Polizotto *et al.* (1975) tinham obtido resultados idênticos neste aspecto. Cao e Tibbitts (1993, 1994) observaram que as plantas se desenvolveram melhor quando estavam presentes as duas formas de azoto e o NH_4^+ representava 8 a 20 % do azoto disponível. Os autores concluíram, também, que a mistura reduz a sensibilidade das plantas ao pH do meio.

O ião nitrato é transportado para a parte aérea através do xilema. Sendo bem tolerado pelas plantas, pode acumular-se nos seus tecidos em quantidades elevadas. Para ser incorporado nos compostos orgânicos tem de ser reduzido a NH_4^+ . O processo é mediado pelas enzimas *nitrato redutase*, que reduz os nitratos a nitritos, e *nitrito redutase*, que converte os nitritos em NH_4^+ (Franco e Munns, 1982; Marschner, 1986). A nitrato redutase considera-se ser a enzima reguladora do processo (Gárate, 1994). Em batateiras, a actividade da nitrato redutase aparece localizada sobretudo nas folhas e caules jovens (Millard e

MacKerron, 1986; Kapoor e Li, 1982). Nas raízes e tubérculos, a sua actividade parece ser insignificante (Kapoor e Li, 1982).

As plantas não toleram quantidades elevadas de NH_4^+ nos seus tecidos. Nestas circunstâncias, são produzidas reacções tóxicas que retardam o crescimento. Em batateira, o fenómeno foi verificado por Polizotto *et al.* (1977) e Cao e Tibbitts (1993, 1994). Assim, as iões NH_4^+ absorvidos ou formados por redução dos nitratos são rapidamente assimilados na raiz ou no local onde foram produzidos. Esta é uma das grandes limitações das plantas na absorção do NH_4^+ , dada a diminuição rápida dos glúcidos disponíveis (Cao e Tibbitts, 1994). As enzimas chave da assimilação do NH_4^+ são a *glutamina sintetase* e a *glutamato sintetase* (Marschner, 1986; Mills e Jones, 1996).

As plantas podem absorver selectivamente elementos nutrientes, incluindo nitratos, de forma mais que proporcional à sua disponibilidade no meio (Morard *et al.*, 1993). Desta forma, a generalidade das plantas, incluindo a batateira, podem absorver mais azoto que as suas necessidades metabólicas imediatas, acumulando-se o excesso nos seus tecidos (Greenwood *et al.*, 1985 a). Este fenómeno é designado de consumo de luxo (Santos, 1996). Na batateira, o azoto em excesso aparece inicialmente na forma de proteína solúvel nas folhas e na forma de nitratos nos caules, sendo as formas reduzidas o componente principal dos tubérculos durante o seu crescimento (Millard e Marshall, 1986). Os pecíolos das folhas são também órgãos de acumulação preferencial de nitratos (ver 2.3.5). O consumo de luxo pode ser de extrema importância, porque permite à planta armazenar azoto que de outra forma poderia ser perdido por lixiviação (Zhen e Leigh, 1990).

Os nitratos são imóveis no floema (Gárate, 1994). Logo que chegam às células, os nitratos em excesso são armazenados nos vacúolos (Martinoia *et al.*, 1981), tornando-se progressivamente disponíveis quando as quantidades absorvidas são insuficientes (Greenwood *et al.*, 1985 a; Zhen e Leigh, 1990; Hernandez *et al.*, 1995).

2.4.2 – Efeito do azoto no desenvolvimento das plantas e na produção de tubérculos

2.4.2.1- Radiação interceptada e eficiência fotossintética

A acumulação de matéria seca nas plantas depende da radiação interceptada e da eficiência fotossintética. Allen e Scott (1980) demonstraram a existência de relações lineares entre a quantidade de radiação interceptada pela canópia e a acumulação de matéria seca na

planta numa gama de condições ecológicas variadas. A eficiência fotossintética foi praticamente constante.

O azoto exerce grande influência na radiação interceptada através do seu efeito na dimensão do aparelho fotossintético e na manutenção da área foliar por períodos de tempo mais longos. O efeito do azoto na eficiência fotossintética é comparativamente menor (Dyson e Watson, 1971; Firman e Allen, 1988; Harris, 1992).

Em batateiras que crescem com limitações de azoto, a dominância apical imposta pelo gomo terminal inibe o desenvolvimento de gomos laterais. Se a restrição de azoto for muito intensa, a inibição de ramificações laterais pode ser completa. A própria extensão dos caules e o número e dimensão das folhas que se desenvolvem a partir do gomo terminal é diminuída (Watson, 1963). O aumento das dimensões do aparelho fotossintético, associado à aplicação de doses crescentes de azoto, foi registado em diversos estudos (Dyson e Watson, 1971; Kleinkopf *et al.*, 1981; Millard e MacKerron, 1986; Coelho, 1992; Almeida, 1995; Rodrigues, 1995). O efeito traduz-se sobretudo pelo estímulo nas ramificações aéreas que, segundo Watson (1963), podem ser responsáveis por metade da área foliar da planta.

O azoto prolonga a duração da área foliar, ao promover as ramificações laterais, mas reduz a longevidade das folhas individuais (Millard e MacKerron, 1986). A duração da capacidade fotossintética das folhas individuais depende da incidência da luz. A taxa fotossintética de uma folha jovem pode decair rapidamente pelo aumento da densidade da canópia. Firman e Allen (1988) verificaram que as folhas da base, ensombradas, perdem a capacidade fotossintética em duas semanas, enquanto as folhas bem expostas a mantêm durante oito semanas. Contudo, Gunasena e Harris (1969, 1971) e Clutterbuck e Simpson (1978) demonstraram a existência de correlações elevadas entre a duração da área foliar e a produção de tubérculos. Assim, para se obterem produções elevadas é muito importante o estabelecimento precoce e um bom desenvolvimento da área foliar, mas também a sua persistência.

Azoto em deficiência ou em excesso pode diminuir a eficiência fotossintética. Mehouchi e Lemeur (1993) registaram uma redução da fotossíntese líquida em plantas que cresceram em soluções nutritivas com limitações severas de azoto, fósforo e potássio. O efeito da deficiência de azoto foi mais evidente que o dos restantes elementos. Em campo, o efeito do azoto na eficiência fotossintética é relativamente diminuto. As clorofilas são um destino prioritário para o azoto, e o azoto disponível em solos agrícolas nunca é suficientemente baixo para limitar as taxas fotossintéticas das folhas (Gregory *et al.*, 1981; Firman e Allen, 1988). O azoto em excesso pode afectar a relação linear entre a radiação interceptada e a acumulação

de matéria seca nas plantas. Harris (1992) apresenta os resultados de ensaios de campo de duas cultivares de batateira de ciclos de duração diferente: a cv. Wilja, de ciclo curto e a cv. Cara, de ciclo mais longo. Para a Wilja, a matéria seca total na planta (até 103 dias após plantação) esteve linearmente correlacionada com a quantidade total de radiação interceptada, para doses de azoto de 0 a 740 kg N ha⁻¹. A radiação interceptada explicou 98 % da variância encontrada na matéria seca total. O efeito do azoto na acumulação de matéria seca total pode assim ser inteiramente atribuído ao seu efeito no aparelho fotossintético. Para a cv. Cara (até 131 dias após plantação), a relação foi linear para doses até 340 kg N ha⁻¹. Para 750 kg N ha⁻¹ a eficiência fotossintética foi inferior, decrescendo, sobretudo, à medida que a radiação interceptada acumulada aumentou.

2.4.2.2 – Tuberização e desenvolvimento inicial dos tubérculos

Em culturas como a batateira, existe uma forte competição por assimilados entre o crescimento vegetativo e órgãos de reserva (Kleinkopf *et al.*, 1981; Marschner, 1986). Os factores ambientais que promovem o desenvolvimento vegetativo, como o azoto, tendem a atrasar o início do processo de armazenamento e a originar um decréscimo na taxa de acumulação de reservas (Kleinkopf *et al.*, 1981).

Sattelmacher e Marschner (1979) demonstraram que o azoto pode inibir, completamente, o início da tuberização em cultura hidropónica. Contudo, existe alguma controvérsia sobre se o fenómeno é observável em campo. Nos estudos de Gunasena e Harris (1968, 1969, 1971) e Dyson e Watson (1971) não ficou demonstrado que o azoto aplicado em fundo pudesse atrasar o início da tuberização. Coelho (1992) observou, mesmo, um ligeiro estímulo na tuberização com doses elevadas de azoto, utilizando a cv. Spunta. Harris (1992), em revisão sobre o assunto, refere que não há evidências experimentais claras que o fenómeno possa ocorrer em condições de campo.

Devidamente documentado está o efeito das doses elevadas de azoto no atraso do desenvolvimento inicial dos tubérculos. O fenómeno foi registado por Dyson e Watson (1971), Gunasena e Harris (1971), Kleinkopf *et al.* (1981), Roberts *et al.* (1982), Ojala *et al.* (1990), Coelho (1992) e Almeida (1995). Kleinkopf *et al.* (1981) quantificaram o atraso na fase linear de crescimento dos tubérculos em 7 a 10 dias para cultivares de crescimento indeterminado.

2.4.2.3 – Produção de tubérculos

Allen e Scott (1980) consideram existir, também, uma relação linear entre a radiação interceptada e a produção de tubérculos, à semelhança do que foi referido para acumulação de matéria seca na totalidade da planta (2.4.2.1). Assim, na ausência de doenças ou stress hídrico, o principal objectivo para a cultura consiste em maximizar a radiação interceptada (Allen e Scott, 1980). Contudo, a relação entre a radiação interceptada e a produção de tubérculos pode ser afectada, em maior ou menor extensão, pela dose de azoto, devido ao efeito que exerce no desenvolvimento inicial dos tubérculos e na eficiência de conversão da radiação em tubérculos, e_{tuber} (Harris, 1992).

A quantidade de azoto que maximiza a produção de tubérculos depende da forma como a redistribuição da matéria seca nas fases finais pode compensar o atraso no desenvolvimento inicial dos tubérculos. Millard e Marshall (1986) verificaram que, na cv. Maris Piper, o aumento da radiação interceptada, em resposta ao azoto, foi compensando os sucessivos atrasos no desenvolvimento inicial dos tubérculos. Concluíram que o efeito do azoto na produção de tubérculos dependia da data de colheita.

Para Harris (1992), a relação entre radiação interceptada e produção de tubérculos, bem como a resposta ao azoto, depende da cultivar. O autor apresenta os resultados comparativos das cultivares Wilja, de ciclo curto, e Cara, de ciclo longo. Para a cv. Wilja, a dose de azoto aumenta a radiação interceptada e, conseqüentemente, a acumulação de matéria seca na canópia. Para níveis de azoto superiores a 70 kg N ha^{-1} , o crescimento inicial dos tubérculos é atrasado, mas os valores de e_{tuber} aumentam ligeiramente. Desta forma, e para esta cultivar, foi estabelecida uma relação linear entre a quantidade total de radiação interceptada e a produção de tubérculos. Na cv. Cara, o atraso no desenvolvimento inicial dos tubérculos relativamente à radiação interceptada, provocado pelo azoto, foi muito exagerado. De igual forma, os valores de e_{tuber} aumentaram significativamente com o nível de azoto aplicado, particularmente acima de 150 kg N ha^{-1} . Para esta cultivar, foram registados valores de e_{tuber} excepcionalmente altos no final do ciclo, atribuídos à melhor redistribuição da matéria seca dos caules e folhas para os tubérculos. Assim, a relação entre radiação interceptada e produção de tubérculos foi muito variável e a dose óptima de azoto ficou claramente dependente da extensão em que a redistribuição da matéria seca nas fases finais pôde compensar o atraso no desenvolvimento inicial dos tubérculos.

2.4.2.4 - Curvas de resposta à fertilização azotada

Tem havido alguma dificuldade em encontrar consenso relativamente ao modelo que melhor traduz a resposta da produção de tubérculos aos fertilizantes azotados. Argumentos de natureza biológica e estatística têm sido utilizados na defesa de modelos exponenciais ou de modelos quadráticos. Para Harris (1992), as dificuldades surgem devido ao reduzido número de níveis de azoto que caracteriza as experiências de fertilização e ao facto de raramente se ter em conta as interações entre factores de crescimento, designadamente entre níveis de nutrientes.

A maior parte dos investigadores utiliza modelos quadráticos para ajustar a resposta das plantas à fertilização azotada. Segundo Black (1993), o sucesso da função quadrática deve-se à sua simplicidade e familiaridade entre os investigadores. Efectivamente, parece haver alguma predisposição para a utilização de modelos quadráticos. Porter e Sisson (1991 a) não registaram decréscimos na produção da cv. Shepody quando utilizaram doses de azoto até 270 kg ha⁻¹ e, no entanto, utilizaram a função quadrática.

A função quadrática apresenta as importantes características de ter ponto de inversão e ser simétrica relativamente a esse ponto. Marschner (1986) admite a existência de um ponto de inversão para os elementos minerais, incluindo o azoto, devido a um possível número de factores como a acama, toxicidade do elemento *per se* ou por indução de deficiência de outros nutrientes e desequilíbrios hormonais. Holliday (1963) e Birch *et al.* (1967) aceitam a existência de um ponto de inversão, mas criticam o facto da curva quadrática ser simétrica. Os autores sugerem a utilização da equação $y = a + b x^{1/2} + c x$, porque tem ponto de inversão mas não é simétrica, parecendo fazer maior sentido biológico.

Na cultura da batata, a utilização da função exponencial assintótica (tipo Mitscherlich) é também atractiva, na medida em que a cultura tende a formar um extenso patamar no qual a produção não decresce mesmo para doses excessivas de azoto (MacKerron *et al.*, 1993). A resposta em patamar permite, também, a utilização de modelos lineares descontínuos (Black, 1993). Contudo, segundo o autor, este é um ajustamento irrealista do ponto de vista biológico, devido à mudança abrupta na evolução da produção no ponto de inserção dos dois segmentos de recta.

Alguns investigadores utilizaram modelos exponenciais modificados que podem apresentar ou não ponto de inversão (Lauer, 1986 a,b; Neeteson e Wadman, 1987; Neeteson e Zwetsloot, 1989). Neeteson e Wadman (1987), em estudos que envolveram 99 ensaios de fertilização que decorreram na Holanda, não obtiveram o melhor ajustamento com o modelo

quadrático para a maioria das experiências. No entanto, observaram que, nalgumas delas, havia um ponto de inversão a partir do qual a produção de tubérculos decrescia com a dose de azoto. Estes autores verificaram que o melhor ajustamento, em grande parte das experiências, foi conseguido com um modelo exponencial modificado. A função exponencial foi modificada pela adição de um termo linear que permite o ajustamento a um decréscimo eventual na produção a partir da dose óptima de azoto. A função tem a forma $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 e^{ax}$.

Para Harris (1992), a curva de resposta depende da cultivar. Para cultivares de ciclo curto, tipo Wilja, em que existe uma relação linear entre a radiação interceptada e a produção de tubérculos, a qual é pouco afectada pelo azoto, espera-se uma relação assintótica entre o azoto disponível e a produção, já que é esta a relação entre a dose de azoto e a radiação interceptada. Como estas cultivares resistem ao atraso no desenvolvimento inicial dos tubérculos, a relação será sempre assintótica independentemente das condições de crescimento nas fases finais do ciclo e da data de colheita. Para cultivares de ciclo longo, tipo Cara, em que os valores de e_{tuber} são frequentemente muito afectados pelo azoto aplicado, espera-se uma curva de resposta que denote um ponto de inversão em condições onde a depressão inicial no desenvolvimento dos tubérculos não for compensada pelo aumento de e_{tuber} nas fases finais. Assim, nas cultivares que têm grande tendência para investir em folhas, é de esperar curvas de resposta variáveis, dependendo das condições ambientais e sanitárias de fim de ciclo e da data de colheita.

2.4.2.5 – Considerações económicas

Neeteson e Wadman (1987) calcularam a aplicação óptima de azoto com base em modelos exponenciais modificados e quadráticos ajustados individualmente a cada uma de 99 experiências de campo. A dose óptima de azoto foi encontrada para valores desde 0 a 400 kg ha⁻¹. Contudo, a quantidade óptima de nutriente teve um intervalo de confiança extraordinariamente elevado. Em 60 % das experiências, aquele valor foi de 300 kg ha⁻¹. Os investigadores justificaram a elevada amplitude dos intervalos de confiança com o facto da produção raramente decrescer com a aplicação de azoto, mesmo que em quantidades extremamente elevadas. A variabilidade experimental foi o segundo argumento utilizado.

Harris (1992) considera que uma curva de resposta sem um ponto de inversão levanta sérios problemas na determinação da dose óptima de azoto. Atendendo ao elevado valor da

produção relativamente ao custo do azoto, o retorno económico mantém-se progressivamente favorável, se bem que com acréscimos muito reduzidos, numa gama muito ampla de aplicações de azoto. Nestas circunstâncias é impossível determinar, com um grau de previsão aceitável, a quantidade de fertilizante a aplicar. Segundo Harris (1992), acresce o facto da falta de rigor na previsão ser de reduzidas consequências financeiras. Nesta cultura, a restrição ao uso de fertilizantes azotados em excesso terá maior justificação ambiental que económica.

2.4.3 – Efeito do azoto na qualidade dos tubérculos

A qualidade dos tubérculos está, em primeiro lugar, relacionada com aspectos genéticos. Contudo, existem factores ambientais, designadamente de ordem nutritiva, que exercem um efeito decisivo (Harris, 1992).

O calibre é um aspecto qualitativo importante na formação do rendimento da cultura. Em batata/semente, por exemplo, os tubérculos de grandes dimensões não são comercializados como propágulos. Assim, a preferência por tubérculos de maior ou menor dimensão depende do destino a dar ao produto. Diversos estudos têm demonstrado que a proporção de tubérculos de grandes dimensões aumenta com doses crescentes de azoto (Gardner e Jones, 1975; Sanderson e White, 1987; Castro, 1988; Almeida, 1995), mesmo quando a produção total não aumenta (Goffart e Guiot, 1993). Contudo, Lauer (1986 b) não encontrou diferenças significativas na dimensão dos tubérculos com as doses de azoto e Tyler *et al.* (1983) registaram aumentos significativos apenas no calibre de refugo.

A percentagem de matéria seca (%MS) é uma das características qualitativas mais importantes dos tubérculos destinados à transformação industrial. Estima-se, através da gravidade específica, pela relação linear que existe entre os dois parâmetros (Storey e Davies, 1992). O efeito do azoto na %MS dos tubérculos é controverso. Em diversos estudos foram registados decréscimos na %MS com a dose de azoto (McDole, 1972; Guarda *et al.*, 1994), enquanto noutros ocorreu o inverso (Borin e Magrini, 1989; Borin e Grigolo, 1994). Contudo, a ausência de efeito significativo até à dose óptima de azoto tem sido o resultado mais comum (Lauer, 1986b; Castro, 1988, 1994; Goffart e Guiot, 1993; Porter e Sisson, 1993; Joern e Vitosh, 1995a). Jenkins e Nelson (1992) obtiveram decréscimos e acréscimos significativos, até à dose máxima utilizada (240 kg N ha^{-1}) em dois anos de ensaios consecutivos. Rodrigues *et al.* (1998 b) registaram um acréscimo na %MS com 50 kg N ha^{-1} relativamente à testemunha e depois um decréscimo até à dose que conduziu à produção mais elevada. Os

autores concluíram ser, aparentemente, impossível maximizar, simultaneamente, a %MS e a produção de tubérculos.

As flutuações na disponibilidade de azoto no solo durante a fase de engrossamento dos tubérculos podem originar a paragem e a retoma no seu crescimento. Se isto acontecer, o crescimento é retomado apenas nas zonas meristematicamente mais activas originando deformações nos tubérculos. Estas deformações são designadas de crescimento secundário ou recrescimento (Martins, 1990). Em campo, quando ocorrem deformações em extensão apreciável, normalmente estão associadas a variações na disponibilidade de água (Epstein e Grant, 1973). O efeito do azoto é menos importante, já que é difícil ocorrerem flutuações suficientemente elevadas na disponibilidade do nutriente que conduzam a estas alterações drásticas no crescimento.

A ingestão de nitratos em quantidades elevadas pode ter implicações extremamente negativas para a saúde (2.1.4.4). Nos tubérculos, o processo de acumulação de nitratos não está ainda devidamente esclarecido. Os nitratos, sendo imóveis no floema, não atingem com facilidade os tubérculos. Contudo, Mühlhing *et al.* (1994) demonstraram que uma proporção apreciável pode entrar pela superfície dos próprios tubérculos. Esse valor atingiu 31 %, dependendo do teor de nitratos no meio. Independentemente da forma como chegam aos tubérculos, o teor de nitratos parece estar directamente relacionado com a disponibilidade de azoto no meio (Carter e Bosma, 1974; Augustin *et al.*, 1977; Mondy *et al.*, 1986; Nitsch e varis, 1991; Mühlhing *et al.*, 1994). Os valores que se atingem são normalmente baixos, se comparados com outros vegetais (Wilson, 1949; Maynard e Barker, 1972). Contudo, quando se combinam situações de fertilização azotada excessiva com teores de humidade do solo baixos, os nitratos podem atingir níveis bastante elevados (Augustin *et al.*, 1977; McDole e McMaster, 1978). Nitsch e Varis (1991) referem que, na Alemanha, têm sido encontrados no mercado tubérculos com teores de nitratos até 500 mg kg⁻¹, dependendo da sua origem. Referem, também, que os tubérculos imaturos (primores) apresentam, normalmente, valores mais elevados. Tendo em conta que podem ser ingeridas quantidades bastante elevadas deste alimento, os autores não concordam com a ideia generalizada de que o teor de nitratos nos tubérculos não justifica qualquer preocupação.

Diversos outros aspectos qualitativos podem ser influenciados pela fertilização azotada. O azoto parece exercer uma acção negativa nalguns tipos de desordens internas como o enegrecimento dos tubérculos após cozedura, o coração oco e a acumulação de glicoalcaloides (Storey e Davies, 1992). Contudo, Castro (1994) não registou qualquer efeito significativo do azoto no enegrecimento dos tubérculos. A cor da batata frita parece, também, não ser

prejudica pela fertilização azotada (Guarda *et al.*, 1994; Almeida, 1995). Por outro lado, o teor proteico é influenciado, positivamente, pelo aumento da disponibilidade de azoto no solo (Goffart e Guiot, 1993).

2.4.4 – Efeito das técnicas de aplicação e das formas de azoto

Alguns aspectos relacionados com as técnicas de aplicação foram revistos em 2.1.5.1, no âmbito da eficiência de uso do nutriente. De forma a não se repetir informação, apenas se incluem neste ponto os aspectos eminentemente relacionados com a cultura da batata.

2.4.4.1 – Aplicações fraccionadas de azoto

Dado tratar-se de uma planta de ciclo vegetativo relativamente curto, a aplicação da totalidade do azoto em fundo é a prática corrente na fertilização da cultura da batata. A distribuição do azoto em duas ou mais aplicações, uma em fundo e outra(s) durante o ciclo, bem como a aplicação multifraccionada em fertirrigação, são também possíveis.

Com o fraccionamento do azoto procura-se atingir dois objectivos principais: (i) promover a recuperação do azoto aplicado, ajustando melhor a disponibilidade de nutriente no solo com as necessidades das plantas; e (ii) evitar atrasos no desenvolvimento inicial dos tubérculos, com efeitos potencialmente negativos na produção, tal como foi visto em 2.4.2.3.

Diversos estudos têm demonstrado que os efeitos do fraccionamento na produção de tubérculos podem ser muito variados. A ausência de efeito significativo foi o resultado mais vezes registado (MacLean, 1984; Millard e Marshall, 1986, Evanylo, 1989 b; O’Beirne e Cassidy, 1990; Nitsch e Varis, 1991; Tavares, 1993; Rodrigues, 1995). Contudo, vários investigadores registaram acréscimos na produção de tubérculos pelo fraccionamento (Gunasena e Harris, 1969; Loon *et al.*, 1987; Westermann *et al.*, 1988; Joern e Vitosh, 1995 a) ou, pelo menos, em alguns dos anos de ensaio (Penny *et al.*, 1984; Millard e Marshall, 1986).

As aplicações fraccionadas do azoto podem apresentar efeitos indesejáveis na qualidade dos tubérculos. Roberts *et al.* (1982) referem que a aplicação de azoto, durante o ciclo, pode provocar crescimento secundário. Contudo, estes resultados são contrariados por Porter e Sisson (1993), que registaram uma melhoria na uniformidade dos tubérculos num terço das suas experiências pelo fraccionamento. Ojala *et al.* (1990) registaram uma redução da gravidade específica dos tubérculos associada a aplicações de azoto em fases avançadas do ciclo.

Grande parte dos investigadores que ensaiou técnicas de fraccionamento fê-lo em solos arenosos, na perspectiva de reduzir a dose a aplicar pela melhoria na eficiência de uso do azoto. Nestas condições, os resultados têm mostrado que a percentagem de azoto recuperado aumenta (Gunasena e Harris, 1969, 1971; Saffigna e Keeney, 1977; Lauer, 1985, 1986 a; Westermann *et al.*, 1988; Roberts *et al.*, 1989; Roberts *et al.*, 1991; Vereijken e Loon, 1991; Westermann e Davis, 1992), embora, em alguns estudos, o fraccionamento não tenha aumentado a eficiência de uso do nutriente (Evanylo, 1989 b; Joern e Vitosh, 1995 b). Atendendo ao aumento dos custos do fraccionamento (MacLean, 1984) e aos efeitos pouco evidentes na produção, a técnica parece ser apenas justificável em ambientes particulares, designadamente em condições favoreçam a saída do nutriente do solo.

2.4.4.2 – Localização do fertilizante

Na cultura da batata, os fertilizantes podem ser distribuídos a lanço, de forma mais ou menos homogênea por todo o terreno, ou nas linhas de plantação. O fundamento teórico da localização dos fertilizantes azotados na linha deve-se ao limitado desenvolvimento do sistema radicular das batateiras e à sua deficiente distribuição (Hofman *et al.*, 1993).

Timm *et al.* (1983) compararam a aplicação de sulfato de amónio a lanço e em linhas na cultura da batata. Para além da produção, avaliaram o estado nutritivo das plantas, determinando o teor de nitratos nos pecíolos. Não registaram diferenças significativas na nutrição azotada das plantas nem na produção. Também Hofman *et al.* (1993) não registaram um efeito positivo inequívoco pela aplicação localizada do fertilizante azotado. Os autores consideram que o resultado final parece depender de diversos factores difíceis de isolar. A ausência de resposta à localização justifica a aplicação generalizada a lanço por ser mais económica.

A localização do azoto pode, inclusive, apresentar alguns inconvenientes. A elevada concentração de algumas formas do nutriente pode ser nociva para as plantas. Hofman *et al.* (1993) alertam para os inconvenientes do aumento da concentração salina. Chu *et al.* (1984) verificaram que a ureia aplicada na linha atrasou a emergência das plantas e as primeiras fases de desenvolvimento. Consequentemente, registaram uma redução na produção de tubérculos. O efeito foi atribuído à toxicidade do NH_3 que se formou. Giroux (1984) verificou que a aplicação de 100 kg N ha^{-1} , na forma de ureia em linhas a um solo arenoso de baixa capacidade de troca catiónica, originou o aparecimento de sintomas de toxicidade de NH_3 . Em solos argilosos, os sintomas de toxicidade não apareceram e a produção não foi afectada. No

solo arenoso, os efeitos negativos desapareceram com a aplicação a lanço. Também Lloyd *et al.* (1983) e MacLean (1984) observaram inconvenientes diversos, relacionados com fitotoxicidade, pela aplicação localizada de formas amoniacais de azoto.

2.4.4.3 – Formas de azoto

Bundy *et al.* (1986) ensaiaram a aplicação de diferentes formas de azoto na cultura da batata de regadio em solos arenosos. O sulfato de amónio originou as produções mais elevadas, relativamente ao nitrato de amónio, nitrato de cálcio e ureia. Na justificação dos resultados, aqueles autores destacaram o maior potencial de perdas por lixiviação de nitratos, quando foi utilizado nitrato de amónio e nitrato de cálcio, e por lixiviação de ureia não hidrolisada e volatilização de amoníaco, quando foi utilizada ureia. Sanderson e White (1987) registaram quebras de produção com a utilização da ureia relativamente ao nitrato de amónio em metade das suas experiências, quando utilizaram doses elevadas de azoto. Os autores atribuíram os resultados a efeitos fitotóxicos da acumulação de amoníaco e/ou nitritos pela utilização da ureia.

Os adubos de libertação gradual de nutrientes são utilizados com o objectivo idêntico ao fraccionamento. Pretende-se que o azoto seja libertado de acordo com as necessidades das culturas ao longo do ciclo vegetativo (Vasconcelos, 1992) e, desta forma, reduzir o potencial de perdas por lixiviação ou volatilização.

Embora se tenham demonstrado vantagens comparativas destas formas de azoto em ambientes particulares, normalmente associados a elevado potencial de lixiviação de nitratos (Prasad, 1976; Walters e Malzer, 1990 a,b; Crawford e Chalk, 1993; Pavlíková *et al.*, 1994), os adubos de libertação gradual de nutrientes têm dado piores resultados na cultura da batata que as formas de actuação mais rápida (Lorenz *et al.*, 1972; Penny *et al.*, 1984). Lorenz *et al.* (1972) utilizaram sulfato de amónio, ureia, ureia formaldeído (ureia-form) e ureia revestida de enxofre (SCU). O sulfato de amónio originou as maiores produções, seguido da ureia e por fim dos adubos de libertação gradual de nutrientes. A concentração de nitratos nos peciolo seguiu a mesma ordem. Nas fases finais do ciclo, também não foi registado qualquer aumento na disponibilidade de azoto com a utilização dos adubos de libertação gradual de nutrientes, encontrando-se parte do azoto na sua forma original. Segundo Harris (1978), a limitação de azoto nas fases iniciais, devido à utilização destes adubos, não permite um desenvolvimento adequado de área foliar, sendo a produção prejudicada. Nas fases finais, mesmo que surja

mais azoto disponível, não significa que ocorra maior absorção, devido à competição entre tubérculos e raízes pelos fotoassimilados.

2.4.5 – Correctivos orgânicos

Os estrumes são fertilizantes de grande estima por parte dos agricultores e a batata é uma das culturas prioritárias para a sua utilização (Holliday *et al.*, 1965). Os fertilizantes orgânicos foram, desde longa data, a principal forma de restituir a fertilidade dos solos. Contudo, as mudanças na forma de exploração dos animais e o aparecimento dos fertilizantes de síntese reduziram a utilização dos estrumes. O desenvolvimento de sistemas de agricultura alternativos (ditos menos intensivos) que apadrinham estes produtos e que, por convicção ou estratégia de mercado, rejeitam o uso de fertilizantes de síntese, tem dado de novo grande importância à sua utilização (Harris, 1992).

A formação de aglomerados populacionais cada vez de maior dimensão e a concentração da actividade pecuária, frequentemente em explorações agrícolas sem terra, deu origem ao aparecimento de quantidades consideráveis de substâncias orgânicas de características muito diversas. Estas substâncias, dado o volume em que são produzidas, constituem-se como um problema ambiental sério e necessitam que seja encontrado um destino urgente. Aparentemente, a agricultura seria o destino mais lógico (Santos, 1995).

Os correctivos orgânicos apresentam alguns inconvenientes relativamente aos fertilizantes de síntese. São mais caros, a sua aplicação é mais incómoda e é difícil prever o seu efeito sobre as culturas. Por outro lado, um armazenamento impróprio e métodos de aplicação deficientes podem resultar em perdas importantes de azoto, com consequências negativas para o ambiente (Mataruka *et al.*, 1993).

Desde longa data se questionou a real importância dos estrumes para as culturas. A principal questão era saber se o efeito dos estrumes podia ser substituído, na íntegra, pelos fertilizantes minerais. Alguns investigadores consideram que os estrumes exercem um efeito traduzível em determinada quantidade de elementos minerais (Boyd, 1959; Neeteson e Zwetsloot, 1989). Contudo, foi também demonstrada a importância dos estrumes nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos (Balashov, 1996; Kubát e Lipavsky, 1994; Schjønning *et al.*, 1994; Benbi *et al.*, 1998). Nesta perspectiva, as substâncias orgânicas poderiam exercer um efeito fertilizante não atribuível à disponibilidade de nutrientes.

Harris (1978) descreve experiências de campo em que se verificou que a resposta aos estrumes foi maior em anos secos e que a resposta ao azoto dos fertilizantes de síntese foi

maior em anos húmidos. O autor verificou que, em estações húmidas, o efeito dos estrumes pôde ser substituído pela adição de mais azoto mineral. Pelo contrário, em anos secos, o efeito dos estrumes não foi substituído na íntegra pela aplicação de mais azoto mineral. Harris (1978) confirmou, posteriormente, estes resultados em experiências em vasos. Holliday *et al.* (1965) apresentam os resultados de dez anos de ensaios em *Leeds*, uma região seca de Inglaterra (610 mm ano^{-1}). Nas cinco estações mais secas, não foi possível substituir o efeito favorável dos estrumes pela aplicação de fertilizantes de síntese. Os autores verificaram, também, que o efeito dos estrumes esteve positivamente correlacionado com a intensidade de secura do ano.

Os estrumes só podem ser considerados fertilizantes importantes se admitirmos a existência de efeitos favoráveis no desenvolvimento das plantas, para além da disponibilidade de nutrientes, ou como forma de resolver um problema ambiental. O seu uso origina percentagens de recuperação de nutrientes tão baixas, designadamente de azoto (Borin e Magrini, 1989; Rodrigues e Coutinho, 1998), que tornam a sua utilização difícil de justificar quando as alternativas são os fertilizantes de síntese, mais cómodos de aplicar e de resultados bem mais previsíveis.

3 – Material e métodos

3.1 – Ensaio de campo com a cultura da batata

3.1.1 – Localização

Os ensaios de campo decorreram na Q.^{ta} de S.^{ta} Apolónia em Bragança. O local situa-se a uma altitude próxima dos 670 m, sendo a latitude e a longitude correspondentes de 41° 49' N e 6° 46' W, respectivamente.

3.1.2 – Solo

A classificação do solo e a descrição das características físico-químicas do perfil têm por base os trabalhos de Réfega e Martins (1984).

O solo assenta sobre rocha básica muito alterada não identificável sob cascalheira de origem diversa. De acordo com a classificação da FAO (FAO/UNESCO, 1974), inclui-se nos *Cambissolos Êutricos*. Na classificação portuguesa, corresponde aos *Solos Litólicos Não Húmicos Pouco Insaturados, Normais* (Cardoso, 1974).

As folhas de cultura dispõem-se no sentido Norte/Sul, segundo o maior comprimento. Apresentam uma ligeira concavidade próxima da linha de menor cota e têm um declive inferior a 2 %. O escoamento superficial é lento e a drenagem interna deficiente. Não há vestígios de erosão. São solos de textura franca, grau de saturação em bases elevado e reacção próxima da neutralidade.

O esboço do perfil e a sua descrição, bem como os parâmetros de natureza físico-química resultantes dos trabalhos de Réfega e Martins (1984), são apresentados no anexo 7.1.

Os elementos necessários à recomendação de fertilização e outros de interesse no âmbito das incubações laboratoriais e extracções químicas foram agora determinados. Os resultados são apresentados nos anexos 7.2 e 7.3 e os assuntos retomados nos pontos 3.1.5.3 e 3.3.2, respectivamente.

3.1.3 – Clima

O Clima da região é do tipo mediterrânico, com alguma influência do regime atlântico (Gonçalves, 1985). Pelo método de Thornthwaite é descrito como B₂ B₁ s b₄:

moderadamente húmido; mesotérmico; défice de água moderado, no Verão; e eficácia térmica no Verão moderada. Na classificação de Köppen, o clima é do tipo Csb: mesotérmico húmido de estação seca e Verão pouco quente mas extenso.

Os dados referentes à temperatura do ar e à precipitação acumulada registados durante os ensaios são apresentados nas figuras 4 e 5, respectivamente. A informação foi organizada por períodos semanais. Os dados foram obtidos na Estação Meteorológica da Q.^{ta} de S.^{ta} Apolónia, que dista cerca de 150 metros das folhas de cultura.

O clima da região pode apresentar constrangimentos ao desenvolvimento da cultura da batata. Um dos mais importantes é o calor excessivo no Verão, cujo efeito se acentua com plantações tardias. Benoit *et al.* (1983) demonstraram que as temperaturas elevadas, até 30 °C, favorecem o desenvolvimento da parte aérea, enquanto para o engrossamento dos tubérculos devem ser inferiores a 25 °C. Por outro lado, Hammes e De Jager (1990) verificaram que a fotossíntese líquida começa a diminuir acima de 20 °C, atingindo um decréscimo de 37 % com temperaturas de 40 °C. A temperatura média das máximas semanais ultrapassou com frequência os 30 °C (figura 4). Em 1996, as médias semanais da temperatura máxima foram superiores a 30 °C durante três semanas, tendo em 1997 e 1998 sido ultrapassado esse valor em quatro e seis semanas, respectivamente. Em 1998, a segunda semana de Agosto registou uma média semanal de 35,1 °C. As máximas absolutas foram de 34,2 °C (6 de Julho), 35 °C (3 de Agosto) e 36,5 °C (9 de Agosto) em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

A duração da estação de crescimento é limitada pelas temperaturas baixas de início e fim de ciclo. Nestes ensaios, devido à introdução da cultura intercalar, a plantação é bastante atrasada e a estação de crescimento pode ficar particularmente encurtada, dependendo da forma como decorrer o mês de Setembro. As plantas, que inicialmente investem na parte aérea, podem ficar impossibilitadas de transportar para os tubérculos parte dos fotoassimilados entretanto acumulados nas folhas. Pela figura 4 verifica-se que, em qualquer dos anos de ensaio, as temperaturas do mês de Setembro foram particularmente elevadas. Em 1996 e 1997, os valores das temperaturas médias semanais variaram entre 14 a 20 °C e as médias das temperaturas mínimas situaram-se entre os 8 e 12 °C. Em 1998 não foram registadas as temperaturas mínimas, mas atendendo aos valores das médias semanais da temperaturas máximas, variando entre 23 e 31 °C, estamos em crer que a temperatura do ar não terá sido um factor limitante ao desenvolvimento de fim de ciclo da cultura.

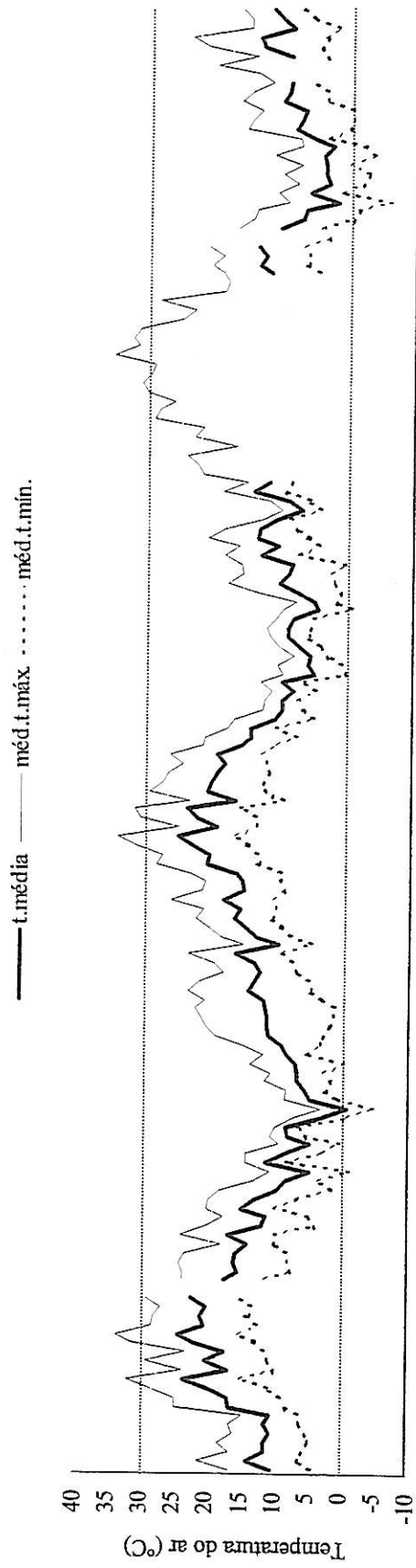


Figura 4 – Valores semanais da temperatura do ar.

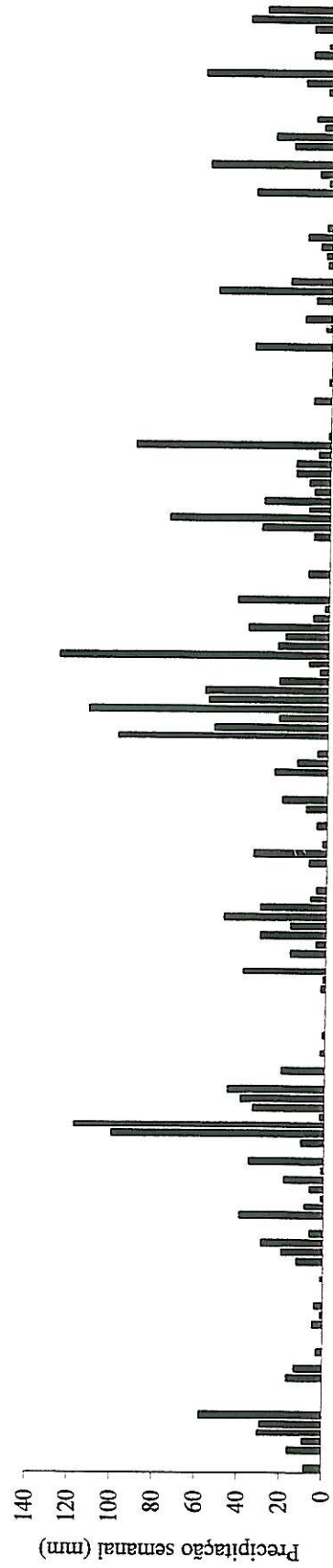


Figura 5 – Valores semanais da precipitação acumulada.

No Inverno, o abaixamento da temperatura do ar condiciona o desenvolvimento da cultura intercalar. Durante os anos de ensaios, as temperaturas mínimas desceram, com frequência, abaixo de 0 °C. A média semanal das mínimas foi inferior a 0 °C durante quatro, uma e seis semanas, nos Invernos de 1996/97, 1997/98 e 1998/99, respectivamente. Nestes Invernos a mínima absoluta registou, respectivamente, os valores -11,8, -5,5 e -7,0 °C.

Em cultura de regadio, a precipitação não apresenta grande importância como elemento definidor das condições de desenvolvimento das plantas e do seu potencial produtivo. Contudo, em estudos de dinâmica de azoto interessa estabelecer a ligação com o potencial de lixiviação de nitratos. Durante os três anos de ensaio registaram-se picos importantes de precipitação que convém destacar (figura 5). Em 1996, na segunda e terceira semana de Maio, a precipitação total acumulada foi de 86,6 mm. Ainda no mesmo ano, foram registados 240 mm durante o mês de Dezembro, tendo-se atingido em cada uma das terceira e quarta semanas valores superiores a 100 mm. Em 1997, nas duas últimas semanas de Maio e nas duas primeiras de Junho foi registada precipitação em valor superior a 120 mm. Nas duas últimas semanas de Outubro e nas três primeiras de Novembro, a precipitação acumulada aproximou-se dos 400 mm, tendo sido registados valores semanais de 98 e 112,2 mm na terceira semana de Outubro e na segunda de Novembro, respectivamente. Em 1998, na primeira semana de Junho, a precipitação atingiu os 90,9 mm e nas duas últimas semanas de Setembro um total de 72,5 mm. Em 1999, a precipitação ocorrida na terceira e na quarta semana de Abril atingiu em conjunto um total de 70,4 mm. A precipitação total acumulada desde os momentos finais da cultura da batata em fins de Setembro até ao corte do centeio em fins de Abril início de Maio foi de 540, 880 e 410 mm em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

3.1.4 – Delineamento experimental

A estrutura base dos ensaios assentou num delineamento em blocos casualizados com três repetições (3 blocos). Os blocos foram posicionados respeitando um ligeiro gradiente no pH, detectado na análise de terras, e atendendo à concavidade da parcela.

As modalidades de fertilização de fundo consistiram em várias doses de azoto (0, 50, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹) aplicado na forma de ureia. Foram também incluídos correctivos orgânicos, designadamente estrume de bovino, estrume de aviário e um resíduo sólido urbano, o fertor, aplicados em quantidades variáveis, de forma a ser introduzido o valor constante de 100 kg N ha⁻¹. Na designação abreviada das modalidades de fertilização de fundo serão

adoptadas as siglas N_f0, N_f50, N_f100, N_f200, N_f300, Ebo, Eav e RSU, seguindo a ordem por que foram anteriormente apresentadas.

Com estas oito modalidades de fertilização pretendeu-se obter plantas em estado nutritivo diferente durante o ciclo cultural e, conseqüentemente, com diferente capacidade de resposta às adubações de cobertura. Com os estrumes pretendeu-se diversificar o potencial de disponibilidade de azoto das modalidades de fundo durante a estação de crescimento, designadamente nas fases finais do ciclo.

Em cobertura foram aplicadas várias doses de azoto (0, 25, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹) na forma de ureia. Estes tratamentos serão abreviados por N_c0, N_c25, N_c50, N_c100 e N_c200, respectivamente. Estas modalidades foram incluídas para se estudar a resposta das plantas, em estado nutritivo variado, à fertilização azotada em cobertura. Pretendia-se verificar, concretamente, quais os níveis críticos dos indicadores do estado nutritivo a partir dos quais se obtinha resposta à adubação e, também, quantificar o azoto a aplicar em cobertura.

A estrutura final dos ensaios ficou organizada na forma de parcelas divididas (*split-plot*) (Little e Hills, 1978). Cada parcela principal (*main plot*), resultante do delineamento de fundo, foi dividida em seis microparcels (*subplots*): cinco para os tratamentos de cobertura; e uma parcela para os ensaios de incubação *in situ*. No total, para estudar o estado nutritivo das plantas, os ensaios eram compostos por 120 unidades experimentais, resultantes de três blocos, oito tratamentos de fundo e cinco modalidades de cobertura (figura 6).

A inclusão de uma microparcela para os ensaios de incubação *in situ* teve por objectivo reduzir o pisoteio nas modalidades onde eram avaliados os componentes da produção. Esta técnica diria que é obrigatória numa cultura cujo sistema radicular é de grande sensibilidade à compactação do solo (De Roo e Waggoner, 1961) e quando a frequência de entradas no ensaio é elevada.

A dimensão de cada microparcela foi definida de forma a garantir amostras para avaliação da produção de dezoito plantas úteis. Em 1996 foram utilizadas apenas seis batateiras por unidade experimental. Com a utilização de um maior número de plantas, pretendeu-se reduzir a variabilidade experimental associada às diferenças entre batateiras. Incluindo as bordaduras, as microparcels mediam 12,25 m². Estas dimensões asseguram, no compasso de plantação utilizado, dezoito plantas úteis e a ausência de movimentos laterais de nitratos por fluxos de massa e difusão que interfiram com as modalidades vizinhas (Sanchez *et al.*, 1987). Desta forma, cada parcela principal era de dimensão equivalente a 73,5 m². A área total em ensaio aproximava-se de 2000 m².

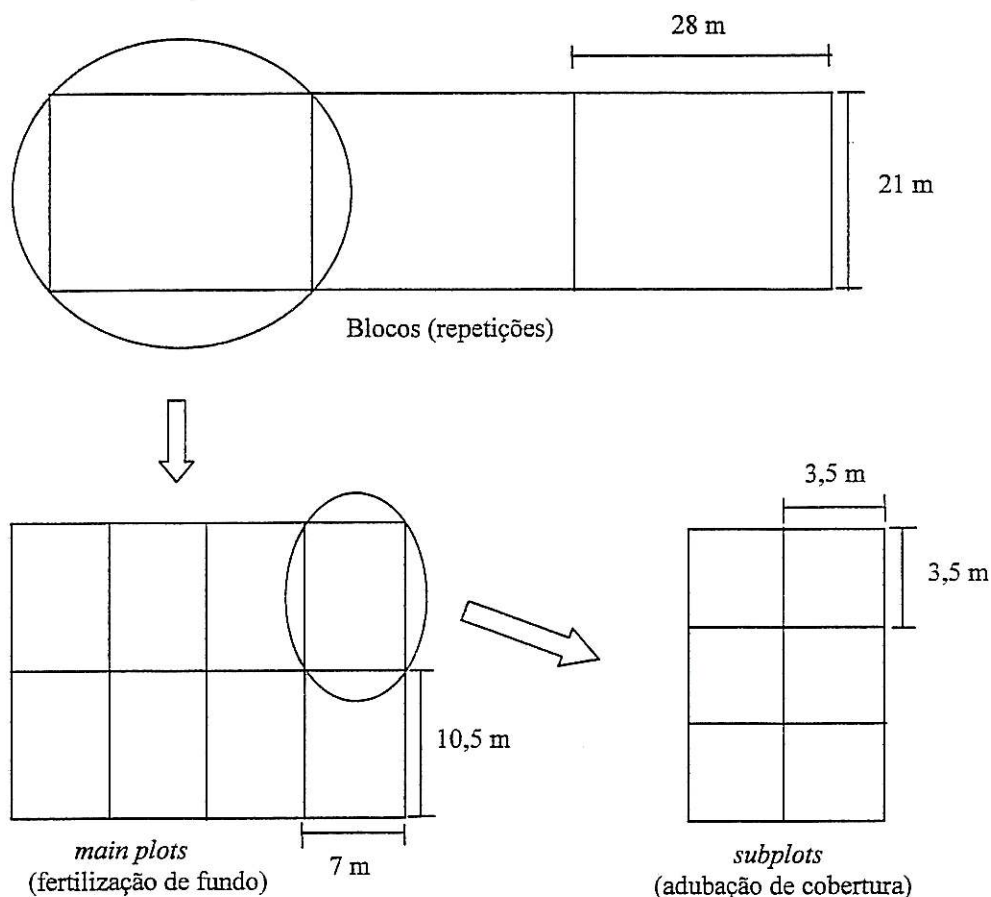


Figura 6 – Organização dos ensaios de campo.

Em 1996 e 1997 não foi incluída a cobertura de 200 kg N ha^{-1} sobre as modalidades de fundo N_f200 e N_f300 . A argumentação baseou-se no facto de que, com as doses de fundo referidas, não haveria resposta a tanto azoto em cobertura. Contudo, em 1998, por facilidades na organização da experiência e no tratamento estatístico dos resultados, foi implementado o delineamento de cobertura completo.

3.1.5 – Técnica cultural

3.1.5.1 - Inserção dos ensaios na rotação

A parcela original estava dividida em oito folhas, com a rotação prado_(4 anos) – ferrejo/batata – ferrejo/milho_(3 anos). Esta versão original foi modificada para os ensaios com um ano de antecedência, tendo sido transformada na rotação trienal ferrejo/milho – ferrejo/batata – ferrejo/sorgo.

As alterações consistiram em retirar o prado da rotação e na utilização de uma mistura de gramíneas como ferrejo anterior à batata (tradicionalmente era utilizada uma consociação vicia * aveia). Estas alterações tiveram por objectivo reduzir a disponibilidade natural de azoto no solo. A passagem de uma rotação octoanual para uma rotação trienal permitiu assegurar, numa só parcela, a área suficiente para os ensaios.

3.1.5.2 – Preparação do solo

Os trabalhos de preparação do solo iniciavam-se logo após o corte da cultura intercalar. A camada superficial do solo era rasgada com um escarificador, para impedir a formação de torrões. De seguida fazia-se uma lavoura com uma charrua de aivecas, a uma profundidade de 30 a 35 cm.

Os trabalhos complementares de preparação do solo eram feitos com um escarificador ao qual se associava uma grade lisa (barra metálica ligada com uma corrente ao quadro do escarificador). Estas escarificações iam decorrendo alternadamente em sentidos opostos até se atingir o grau de esmiuçamento desejado.

3.1.5.3 – Fertilização

A fertilização de fundo incluía os adubos fosfatados e potássicos, aplicados nas quantidades recomendadas pelos resultados da análise sumária (anexo 7.2), e as modalidades de fertilização azotada de fundo previstas no delineamento experimental.

Como fertilizante azotado de síntese foi utilizada a ureia. Este adubo apresenta, como vantagem, o facto de não veicular qualquer outro nutriente que não azoto, excluindo dos ensaios a variabilidade experimental que estaria associada à adição de quantidades variáveis de outros nutrientes.

Como fertilizantes orgânicos foram utilizados estrume de bovino curtido, estrume de aviário e um resíduo sólido urbano, o fertor. O estrume de bovino era colocado a compostar no início do Inverno. Até à data de aplicação era remexido com periodicidade mensal para assegurar arejamento adequado e garantir uma maior homogeneidade. O estrume de aviário não sofria compostagem. Era retirado do alojamento dos animais para ser utilizado. O tratamento consistia apenas na homogeneização de todo o material antes da aplicação. O RSU era desensacado sobre uma superfície lisa. O conteúdo de todos os sacos era misturado, sendo

as amostras constituídas por fertilizante de todos os sacos. A técnica descrita visava reduzir a variabilidade que caracteriza a composição deste material.

Com a antecedência de uma a duas semanas relativamente à aplicação dos correctivos orgânicos eram retiradas amostras para determinações laboratoriais. Os resultados dessas determinações encontram-se no anexo 7.5.

Os fertilizantes foram distribuídos manualmente, de forma homogénea pelos talhões respectivos, e incorporados, de imediato, com escarificações cruzadas, de modo a minimizar as perdas de azoto por volatilização.

Em cobertura foi utilizada a ureia. O adubo era pesado, em função da dose desejada e da área das microparcelsas, e distribuído manualmente a lanço. A incorporação do adubo fazia-se com uma rega, logo após a sua distribuição.

3.1.5.4 – Material vegetal

Foi utilizada batata da cultivar Désireé. Em 1996 escolheu-se o calibre 28-45 mm de batata/semente pré-base. Nos anos seguintes, com a integração dos estudos no projecto PAMAF 6107, que envolvia várias instituições, foi decidido optar-se pelo calibre 45-60 mm da categoria base. Este calibre seria mais fácil de obter, atendendo à quantidade de batata/semente agora necessária. Os propágulos foram sempre de produção nacional, com origem em S. Miguel, nos Açores.

O pré-abrolhamento iniciava-se quatro a seis semanas antes da data provável de plantação. Os tubérculos eram colocados sobre sacos de serapilheira em camada única e eliminados todos os brolhos presentes. O local de abrolhamento era mantido à temperatura ambiente e sob luz difusa. Os períodos de abrolhamento foram de 46, 39 e 42 dias em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

No dia anterior à plantação, e com base numa amostra de 30 tubérculos, eram avaliadas as características de abrolhamento e as dimensões dos propágulos. Os resultados são apresentados no anexo 7.4. Em resumo, foi possível obter propágulos de reduzida dominância apical, apresentando um importante número de brolhos de comprimento maior que 3 mm e regularmente distribuídos pelo tubérculo.

Os tubérculos para plantação eram rigorosamente seleccionados, sendo eliminados os que estavam mal abrolhados ou que apresentavam sintomas de doenças. Eram também excluídos os tubérculos nos limites do calibre, excessivamente pequenos ou demasiado grandes. Esta segregação visava assegurar uma emergência sem falhas e um desenvolvimento

inicial da cultura homogéneo, de forma a garantir que todas as plantas, nas primeiras colheitas de material vegetal, estavam numa idade fisiológica idêntica. Desta forma, pretendeu-se eliminar variabilidade experimental associada a um factor que não estava em estudo.

3.1.5.5 – Plantação

A plantação ocorreu a 28, 28 e 21 de Maio em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Estas datas, aparentemente tardias, devem-se à inclusão da intercalar na rotação. Contudo, são ainda datas de plantação de batata correntes na região.

Foi utilizado um plantador de tubérculos de alimentação manual e distribuição automática por pratos horizontais de duas linhas. A alfaia coloca os tubérculos à profundidade desejada e deixa, desde logo, a amontoa feita, permitindo a utilização, com eficácia, de herbicidas residuais em pré-emergência, por não ser necessário voltar a mobilizar o solo.

Os propágulos foram colocadas num compasso de 0,70 x 0,33 m, equivalente a uma densidade de plantação aproximada de 44 000 tubérculos por hectare. A profundidade de plantação situou-se próxima dos 8 a 10 cm.

A partir de 1997, a amontoa passou a ser reforçada com uma enxada de bicos. Nesta operação retiravam-se as pedras e os torrões que ficavam sobre os camalhões e cobriam-se os tubérculos que eventualmente ficassem expostos à luz. Com esta operação pretendia-se minimizar as falhas à nascença e diminuir o aparecimento de tubérculos esverdeados na colheita.

3.1.5.6 – Tratamentos fitossanitários

Foram efectuados tratamentos fitossanitários contra infestantes, míldio (*Phytophthora infestans*) e escaravelho (*Leptinotarsa decemlineata*). As caldas foram aplicadas com uma pistola de manuseamento manual adaptada a um pulverizador mecânico de jacto projectado. Esta técnica, embora sendo bastante mais demorada, evitava que o tractor voltasse a entrar nos ensaios depois da plantação.

As infestantes foram combatidas recorrendo a herbicidas de pré-emergência com acção residual. As aplicações eram efectuadas quando as primeiras batateiras começavam a emergir. Para melhorar a eficácia do tratamento, era efectuada uma rega muito ligeira depois da aplicação do herbicida. Durante a estação de crescimento, as infestantes que surgiam nos ensaios eram arrancadas à mão. Era comum aparecerem figueiras do inferno (*Datura*

stramonium L.), erva moira (*Solanum nigrum* L.), cata-sol (*Chenopodium album* L.) e milhãs, sobretudo a milhã digitada (*Digitaria sanguinalis* (L) Scop.). Em 1998, a infestação com milhãs atingiu níveis preocupantes, tendo sido necessário recorrer ao uso de um herbicida de pós-emergência.

Para o míldio foi implementado um esquema de tratamentos preventivo. Nas primeiras caldas, quando as plantas se encontravam numa fase de desenvolvimento activo e as condições climáticas eram favoráveis ao desenvolvimento e propagação da doença, eram utilizados fungicidas sistémicos. Depois da floração, utilizaram-se os fungicidas preventivos clássicos.

O escaravelho era combatido ao aparecimento das primeiras larvas. Dada a grande facilidade da praga em ganhar resistência e à elevada incidência de ataques, procurou-se alternar a substância activa.

As datas de aplicação e as principais características dos pesticidas utilizados são apresentados no anexo 7.6.

3.1.5.7 – Rega

A cultura foi regada por aspersão. De acordo com a classificação dos equipamentos de rega apresentada por Raposo (1994), trata-se de uma instalação estacionária temporariamente fixa.

Dada a natureza do ensaio, sobretudo decorrente da facilidade com que o azoto pode ser perdido por lixiviação (2.1.4.4), da interacção que existe entre a disponibilidade de água e o azoto (Clutterbuck e Simpson, 1978) e atendendo à sensibilidade particular da batateira a períodos de défice hídrico durante o ciclo (Lis *et al.*, 1964; Loon, 1981; Ojala *et al.*, 1990), a rega foi a técnica cultural cujo controlo mereceu maior atenção.

Para evitar a utilização de água em excesso foi determinada a dotação de rega e o intervalo de tempo entre regas.

3.1.5.7.1 - Cálculo da dotação de rega

Dados utilizados

Densidade aparente, d - 1,2 (obtido a partir do anexo 7.3);

Capacidade de campo, C_c (pF 2,7) - 15,4 (obtido a partir do anexo 7.3);

Coef. de emurchecimento, C_e (pF 4,2) - 8,5 (obtido a partir do anexo 7.3);

Coef. facilmente utilizável, p - 0,25 (Doorembos e Kassan, 1986);

Eficiência de rega, er - 70 % (Doorembos e Pruit, 1977);

Profundidade radicular média, Z_r - 400 a 600 mm (Doorembos e Pruit, 1977).

Capacidade de armazenamento de água (U)

Utilizando a expressão $U = d \cdot Z_r \cdot (C_c - C_e)/100$, obtém-se uma capacidade de armazenamento de água de 41,4 mm nos 60 cm superficiais do solo.

Dotação útil de rega (hu)

Através da expressão $hu = U \cdot p$, é obtida uma dotação útil de rega equivalente a 12,42 mm.

Dotação real de rega (hr)

A dotação real de rega é dada pela expressão $hr = hu/er$. Com os dados utilizados obtém-se o valor aproximado de 18 mm de água.

A aplicação da quantidade de água desejada era conseguida pela transformação da dotação real em tempo de rega. O processo consistia na avaliação da água recuperada em pluviômetros, cujo diâmetro da boca era conhecido, colocados aleatoriamente pelo terreno. O método servia, também, para avaliar a uniformidade da rega.

3.1.5.7.2 - Cálculo do intervalo de tempo entre regas

O intervalo de tempo entre regas (D) foi determinado com base na normal climatológica publicada para a região.

Dados utilizados

Evapotranspiração potencial, ET_p (Mendes e Bettencourt, 1980):

Junho - 142 mm; Julho - 170 mm; Agosto - 147 mm; e Setembro - 77 mm.

Coefficiente cultural, K_c (Doorembos e Kassam, 1986):

Emergência e fase inicial de desenvolvimento – 0,4 a 0,5 (20 a 30 dias);

Desenvolvimento vegetativo – 0,7 a 0,8 (30 a 40 dias);

Meia estação – 1,05 a 1,15 (30 a 60 dias);

Fim de estação – 0,85 a 0,95 (20 a 35 dias);

Maturação – 0,7 a 0,75.

Intervalo de tempo entre rega

No quadro 1 são apresentados os cálculos do intervalo de tempo entre regas, tomando por base um ciclo cultural teórico médio para esta cultivar.

Quadro 1 - Intervalo de tempo entre regas.

Data	ET_p (mm/dia)	K_c	ET_c^* (mm/dia)	$D (hr/ET_c)$ (dias)
1 a 14 Junho	4,73	0,45	2,13	8,45
15 a 31 Junho	4,73	0,75	3,55	5,07
1 a 19 Julho	5,48	0,75	4,11	4,38
20 a 31 Julho	5,48	1,10	6,03	2,99
1 a 28 Agosto	4,74	1,10	5,21	3,45
29 a 31 Agosto	4,74	0,90	4,27	4,22
1 a 17 Setembro	2,57	0,90	2,31	7,79
18 a 30 Setembro	2,57	0,70	1,80	10,00

*Evapotranspiração cultural, $ET_c = ET_p \cdot K_c$

Em função das condições climáticas verificadas ao longo da estação de crescimento, foram sendo feitos os ajustamentos considerados adequados. Por vezes, tornou-se necessário sincronizar a rega com as restantes intervenções nos ensaios, designadamente com as práticas culturais e com a colheita de terras e material vegetal. No anexo 7.7 são apresentadas as datas e as dotações reais de rega para os três anos de ensaio.

3.1.5.7.3 - Uniformidade da rega

A uniformidade da rega diz respeito à regularidade da distribuição da água pelo terreno. Raposo (1994) determina um coeficiente de uniformidade da rega (C_u) usando a expressão

$$C_u = 100 \left(1 - \frac{\sum |x|}{m \cdot n} \right),$$

em que: m é a média aritmética das alturas pluviométricas registadas; n é o número de observações; e x o desvio da média de cada observação.

Os coeficientes de uniformidade foram determinados com base nos resultados apresentados no anexo 7.7 e situaram-se entre 75 e 80 %. Raposo (1994) considera como valores aceitáveis coeficientes de uniformidade da rega entre 75 a 85 %.

O vento é o factor decisivo na regularidade da distribuição da água de rega. Atendendo a este facto, as regas foram sempre feitas às primeiras horas do dia, de forma a coincidirem com os momentos de menor turbulência atmosférica.

3.1.5.7.4 - Quantidade e qualidade da água

A quantidade total de água que entrou nos ensaios é o resultado do somatório das regas efectuadas e da precipitação natural. Dada a natureza dos ensaios, a qualidade da água foi avaliada pelos seus teores em azoto na forma nítrica e amoniacal.

A água da chuva era recuperada em pluviómetros distribuídos próximos dos ensaios, imediatamente antes de estar prevista a ocorrência de nova precipitação. A água de rega era recolhida, a intervalos regulares durante a estação de crescimento, no rio Fervença junto à conduta de captação de água. As análises foram efectuadas no laboratório de Química da Escola Superior Agrária de Bragança.

A composição da água apresentou-se bastante variável de colheita para colheita. Contudo, não foi possível detectar um padrão de comportamento em função da estação do ano ou mesmo da quantidade de água precipitada. A água de rega apresentou muito menor variação entre as diferentes colheitas. Atendendo a estas considerações, apresentam-se apenas os valores médios das diferentes formas de azoto analisadas. Os resultados são apresentados no quadro 2.

Apesar das diferenças na quantidade de água de rega utilizada nos três anos de ensaio, a quantidade total pouco diferiu, devido à compensação pela água da chuva. Os valores totais foram de 461,1, 461,3 e 438 em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. O azoto introduzido pela água foi de 5,62, 8,56 e 6,21 kg N ha⁻¹, de acordo com a sequência cronológica dos ensaios. Este montante pode ser entendido como um suplemento da fertilização de cobertura.

Contudo, as quantidades relativamente limitadas de azoto e o facto dessas quantidades serem equivalentes em todas as modalidades minimizam a sua importância nos ensaios.

Quadro 2 – Quantidade de água e azoto introduzido nos ensaios pela rega e pela precipitação.

		1996	1997	1998
Água de rega	Quantidade (mm)	360	255	222
	NO ₃ ⁻ (mg N L ⁻¹)	0,60	0,73	0,76
	NO ₂ ⁻ (mg N L ⁻¹)	0,07	0,09	*
	NH ₄ ⁺ (mg N L ⁻¹)	nd	nd	0,36
	N total (kg ha ⁻¹)	3,71**	3,01**	2,49
Água da chuva	Quantidade (mm)	101,1	206,3	216
	NO ₃ ⁻ (mg N L ⁻¹)	0,69	1,46	0,55
	NO ₂ ⁻ (mg N L ⁻¹)	0,03	0,06	*
	NH ₄ ⁺ (mg N L ⁻¹)	nd	nd	1,17
	N total (kg ha ⁻¹)	1,91**	5,55**	3,72
Rega + chuva	Quantidade (mm)	461,1	461,3	438,0
	N total (kg ha ⁻¹)	5,62	8,56	6,21

nd – não determinado; * - incluídos nos nitratos; ** usou-se o valor médio do NH₄⁺ obtido em 1998.

3.1.5.8 – Colheita

As batatas eram colhidas no início de Outubro, num processo que decorria durante três a quatro dias. Depois de devidamente separadas das bordaduras, as plantas eram arrancadas com uma enxada de bicos. O processo de selecção das amostras e as determinações efectuadas na colheita serão descritos em 3.1.6.3.

3.1.6 – Determinações de campo e laboratoriais

3.1.6.1 – Observações fenológicas

A caracterização do desenvolvimento fenológico das plantas justifica-se pelo facto dos indicadores do estado nutritivo variarem com a idade das plantas. Desta forma, procura-se ultrapassar as dificuldades impostas pela ausência de uma escala de estados fenológicos universalmente aceite para esta cultura.

Em 1996 e 1997 foi registada a data de emergência das plantas. Por data de emergência entendeu-se o momento em que a população nascida representava 50 % da população potencial (Portas e Martins, 1981). Em 1998 foram feitas contagens diárias do número de plantas emergidas. A contagem envolvia três amostras de trinta plantas da modalidade de fertilização em que se aplicaram 100 unidades de azoto em fundo. Desta forma, para além de se conhecer a data de emergência, obtinha-se informação suplementar sobre a percentagem de plantas emergidas e sobre a duração do período de germinação.

O processo de avaliação da fenologia da plantas também foi modificado no decorrer dos ensaios. Em 1996 foi feita uma análise descritiva da evolução da rama, da floração e da tuberização nas datas em que se faziam as determinações dos indicadores do estado nutritivo. A análise incidia apenas na modalidade de fertilização em que se aplicaram 100 unidades de azoto. Admitia-se que as plantas sujeitas a este tratamento fertilizante teriam um desenvolvimento fenológico intermédio e representariam o ensaio.

A partir de 1997, foram avaliados quantitativamente diversos parâmetros do desenvolvimento das plantas em todas as modalidades de fertilização. As determinações eram feitas o mais próximo possível das datas de avaliação do estado nutritivo das plantas. A evolução da rama, a floração, a vegetação e o porte foram determinados recorrendo às escalas apresentadas no anexo 7.8. A altura das plantas foi medida com uma régua. A média em cada unidade experimental era obtida medindo, desde o solo até ao botão terminal, o caule mais alto de quatro batateiras seleccionadas aleatoriamente. A taxa de cobertura foi estimada pelo método da grelha. Consiste na utilização de uma grelha metálica, cujos limites exteriores têm a dimensão do compasso de plantação e é internamente dividida em dez rectângulos iguais. Com a grelha na horizontal e com os vértices colocados sobre quatro batateiras definidoras do compasso observa-se qual a proporção de rectângulos (décimos) preenchidos com a folhagem. A média era obtida com três leituras (3 repetições) por unidade experimental.

3.1.6.2 – Indicadores do estado nutritivo

Como indicadores do estado nutritivo, determinaram-se o teor em azoto total nas folhas, o teor de nitratos nos pecíolos e estimativas do teor de clorofila nas folhas. O teor de nitratos nos pecíolos foi determinada por um método expedito e por um método laboratorial. As estimativas do teor de clorofila começaram a ser obtidas apenas na parte final do ensaio de 1997, por só nesta data ter sido possível adquirir o aparelho portátil necessário a esta determinação.

A avaliação do estado nutritivo das plantas era feita com periodicidade aproximadamente quinzenal, com início logo na segunda ou terceira semana após a emergência das plantas. No total, fizeram-se três determinações durante o ciclo. Em 1997 e 1998 fez-se, ainda, uma determinação tardia, para monitorizar a evolução dos indicadores do estado nutritivo após a aplicação da adubação de cobertura. A cobertura era feita imediatamente após a segunda data de amostragem, entre 25 a 35 dias após a emergência. No quadro 3 apresenta-se a calendarização da avaliação do estado nutritivo das plantas e os indicadores determinados.

Quadro 3 – Calendarização das determinações do estado nutritivo das plantas.

Ano	Indicadores do estado nutritivo		
	N folhas	NO ₃ ⁻ pecíolos	Clorofila SPAD
1996	20 DAE (1 Julho)	20 DAE (1 Julho)	
	35 DAE (16 Julho)	35 DAE (16 Julho)	
	48 DAE (29 Julho)	48 DAE (29 Julho)	
1997	15 DAE (25 Junho)	15 DAE (25 Junho)	
	28 DAE (8 Julho)	28 DAE (8 Julho)	
	42 DAE (22-23 Julho)	42 DAE (22-23 Julho)	44 DAE (24 Julho)
	83 DAE (19-20 Agosto)	83 DAE (19-20 Agosto)	
1998	10 DAE (15 Junho)	10 DAE (15 Junho)	10 DAE (15 Junho)
	18 DAE (23 Junho)	18 DAE (23 Junho)	17 DAE (22 Junho)
	34 DAE (9-10 Julho)	34 DAE (9-10 Julho)	35 DAE (10 Julho)
	74 DAE (18-19 Agosto)	74 DAE (18-19 Agosto)	63 DAE (12 Agosto)

As coberturas foram efectuadas em 17 e 9 de Julho e 24 de Junho em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

3.1.6.2.1 - Colheita de folhas

Para determinação do teor de azoto total e de nitratos nos pecíolos foram colhidas amostras de 60 a 80 folhas. Elegiam-se as folhas mais jovens com o limbo completamente expandido. Normalmente, correspondem à quarta ou quinta folha a partir do ápice vegetativo. As folhas eram inseridas em sacos plásticos etiquetados, colocadas em malas térmicas arrefecidas e conduzidas para o laboratório.

No laboratório cada amostra era separada em duas subamostras. A subamostra mais pequena, com 20 a 25 folhas, destinava-se à determinação da percentagem de azoto total. Nas

restantes folhas os pecíolos eram separados dos folíolos. Os pecíolos eram seccionados em pequenos troços e misturados convenientemente, para a determinação do teor de nitratos pelo método laboratorial e pelo método expedito.

3.1.6.2.1.1 – Determinação do teor de azoto total nas folhas

As subamostras de 20 a 25 folhas eram colocadas a secar numa estufa com ventilação forçada, regulada para 65 °C. A secagem terminava quando o peso das amostras estabilizava. Utilizando um moinho Tecator, modelo Cyclotec 1093, as folhas eram moídas até um grau de finura que lhes permitia passar por um crivo com 1 mm de diâmetro.

A percentagem de azoto total nas folhas foi determinada pelo método Kjeldhal, num analisador designado Kjeltex Auto 1030. O método consiste na digestão de uma amostra de 1,000 g num bloco de alumínio a 400 °C, na presença de um catalisador à base de selénio e de ácido sulfúrico concentrado, seguida de destilação e titulação com ácido clorídrico.

3.1.6.2.1.2 – Determinação expedita do teor de nitratos nos pecíolos

Da mistura dos pedaços de pecíolos pesavam-se 5,0 g. Procedia-se à sua maceração, num almofariz, de uma forma suave para evitar salpicos de seiva. O macerado era transferido para copos de vidro graduados com o auxílio de um esguicho com água destilada para irem à placa de aquecimento. Utilizava-se um volume de água idêntico em todos os copos, aproximadamente 100 mL, para que todos iniciassem fervura ao mesmo tempo. Após quinze minutos de fervura eram colocados a arrefecer. À temperatura ambiente, levava-se o volume final a 300 mL com água destilada, de forma a obter-se uma diluição de 1: 60.

Nos extractos era determinado o teor de nitratos em solução, utilizando tiras de teste Reflectoquant® e um reflectómetro portátil designado RQflex®. As tiras de teste são compostas por duas zonas de reacção que contêm um agente redutor que transforma os nitratos em nitritos. Na presença de um tampão ácido, os nitritos reagem com uma amina aromática para formar um sal de diazónio que por sua vez reage com N-(naftil)-etileno diamina para formar uma cor azo vermelho-violeta. Os reflectómetros medem a quantidade de luz reflectida da tira e fazem a conversão da reflectância em nitratos na solução (Jemison e Fox, 1988).

A diluição utilizada permitia a leitura com as tiras de teste, cuja gama de utilização varia entre 5 e 225 mg NO₃⁻ L⁻¹. Nas fases avançadas do ciclo, sobretudo nas modalidades menos

fertilizadas, havia necessidade de se ajustar a diluição. Em geral, utilizava-se simultaneamente mais material vegetal e menor volume de água.

Todos os anos, antes do início da utilização do aparelho, foram feitos testes de calibração. Utilizou-se uma solução padrão de nitrato de potássio com concentrações adequadas à gama de leitura da tira. Os resultados são apresentados na figura 7.

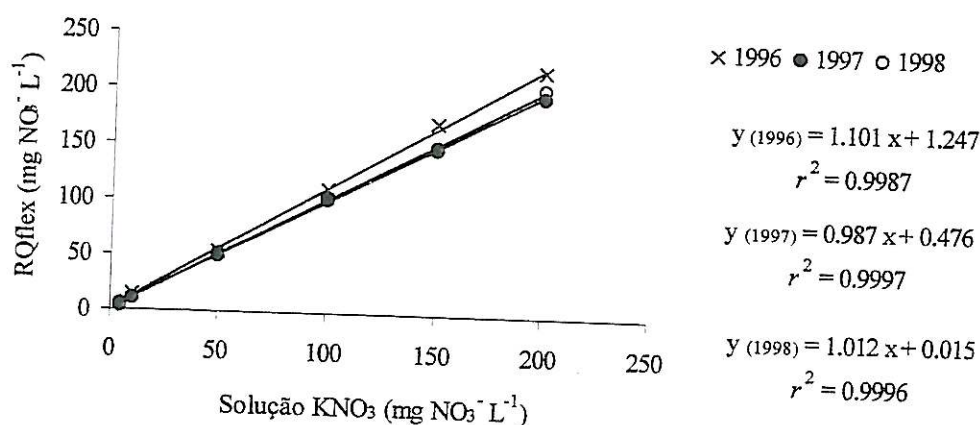


Figura 7 – Relação entre a concentração de nitratos em soluções padrão de nitrato de potássio e as leituras com o RQflex.

Foi conseguido um ajustamento linear, cuja recta apresenta um declive muito próximo da unidade e com um coeficiente de determinação de 0,999. Em 1996, o declive foi significativamente diferente da unidade e a constante diferente de zero. Contudo, como nos anos seguintes não foi rejeitada a hipótese nula de ambos os testes, não nos pareceu justificar-se qualquer correcção aos resultados de campo.

3.1.6.2.1.3 – Determinação laboratorial do teor de nitratos nos pecíolos

Após serem retirados 5 g de pecíolos para a determinação do teor de nitratos pelo método expedito, pesava-se o material que restava e colocava-se a secar em estufa regulada para 65 °C. Após secagem, eram de novo pesados para se obter o seu teor de humidade (em 1996 não foi determinado o teor de humidade dos pecíolos). A determinação do teor de humidade dos pecíolos permitia expressar os resultados com base na matéria seca. Posteriormente os pecíolos eram moídos.

A preparação dos extractos consistia na pesagem de 1,000 g de matéria seca, à qual se adicionavam 50 mL de água destilada. A mistura era agitada durante uma hora e depois filtrada com papel *Watman 40*. Os extractos assim obtidos eram congelados até poderem ser analisados.

Na determinação do teor de nitratos foi utilizado o método da sulfanalamida após redução dos nitratos a nitritos em coluna de cádmio, com leitura por espectrofotometria de absorção molecular, recorrendo a um analisador de fluxo segmentado (Houba *et al.*, 1989). Estas determinações foram efectuadas no laboratório de edafologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

3.1.6.2.2 – Determinação das estimativas do teor de clorofila

Para a obtenção das estimativas do teor de clorofila elegeram-se os folíolos terminais das folhas mais jovens com o limbo completamente expandido, tal como referido por Vos e Bom (1993). São folíolos que estão normalmente bem expostos à luz, independentemente da densidade da canópia. Este aspecto é importante, dada a sensibilidade da clorofila à luz. Os folíolos com aspecto anormal, devido a ataques de insectos ou infectados com doenças, eram excluídos.

Utilizou-se um aparelho portátil designado SPAD-502[®], desenvolvido pela Minolta. O aparelho dispõe de duas hastes, onde se insere o tecido e se encontram as janelas de onde saem os feixes de luz. O SPAD-502[®] mede a transmitância da luz através da folha a 650 nm, que corresponde à região de máxima absorvância pela clorofila. Uma segunda fonte de luz a 940 nm permite a calibração interna (Blackmer e Schepers, 1994). Fornece estimativas adimensionais do teor de clorofila, uma vez que não tem em conta a massa da amostra (Schepers *et al.*, 1992). O aparelho dispõe ainda de um microcomputador que armazena e trata trinta dados. Para ficar garantida uma amostra representativa, cada estimativa envolvia trinta leituras, com base nas quais o aparelho calculava a média.

O aparelho vem equipado com um dispositivo que permite monitorizar a qualidade das estimativas que produz em cada momento. Contudo, antes de se iniciarem as leituras no ensaio, fizeram-se testes de χ^2 e determinou-se o coeficiente de variação dos resultados do aparelho em campo. Os testes consistiram em avaliar a variabilidade das estimativas do aparelho quando as leituras incidiram sobre o mesmo folíolo e a variabilidade do material vegetal quando as leituras incidiam em folíolos diferentes dentro da mesma unidade experimental. No primeiro caso foram feitas trinta leituras sobre um mesmo folíolo e no

segundo caso foi feita uma leitura por folíolo em trinta folíolos diferentes. Cada teste foi repetido em quatro modalidades de fertilização azotada diferentes especialmente preparadas para o efeito. Foram utilizadas as doses de azoto de 300, 150, 75 e 0 kg ha⁻¹ para obter material vegetal de diferentes tonalidades da cor verde. Os resultados são apresentados nas figuras 8 e 9.

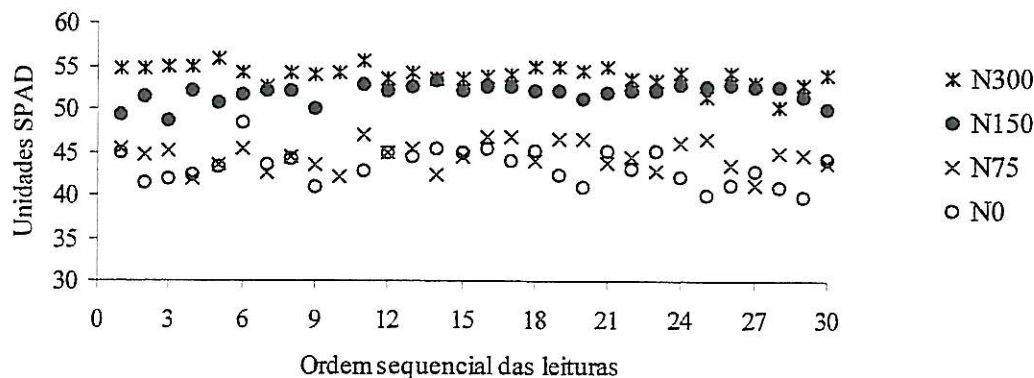


Figura 8 – Variação nos valores SPAD obtidos com leituras sobre o mesmo folíolo.

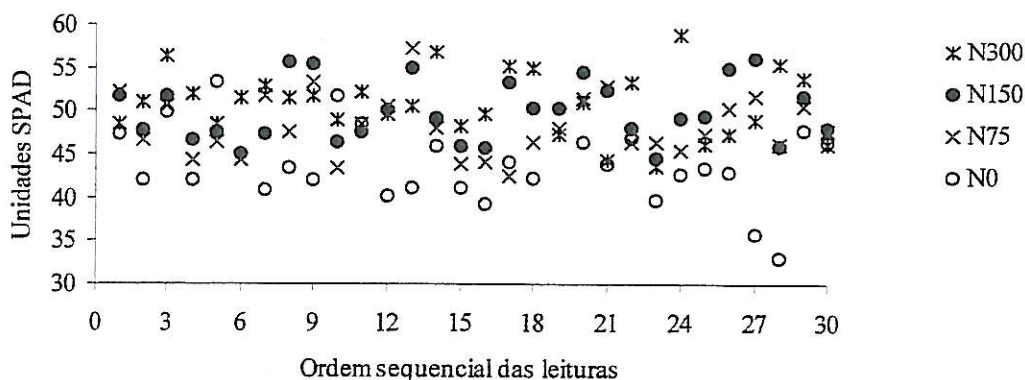


Figura 9 – Variação nos valores SPAD obtidos com leituras sobre folíolos de plantas diferentes.

Os resultados mostraram que as estimativas no teor de clorofila produzidas pelo SPAD 502[®] se ajustam significativamente a uma distribuição normal, quer sejam obtidas sobre o mesmo folíolo, quer sejam obtidas em folíolos diferentes dentro de uma dada unidade experimental.

As leituras sobre o mesmo folíolo medem, de alguma forma, a reprodutibilidade do aparelho, embora, em rigor, o meio não seja homogêneo dada a presença de uma teia de pequenas nervuras que condicionam os resultados. Os coeficientes de variação foram 2,07,

2,12, 3,54 e 4,49 % para os folíolos das modalidades de fertilização em que se aplicaram 300, 150, 75 e 0 kg N ha⁻¹, respectivamente.

A variabilidade dentro de cada modalidade de fertilização foi superior, como seria de esperar. Os coeficientes de variação tomaram os valores 7,16, 6,90, 7,11 e 9,87 % para as modalidades 300, 150, 75 e 0 kg N ha⁻¹, respectivamente. O resultado reflecte uma maior variabilidade na tonalidade entre folíolos de plantas diferentes que dentro do próprio folíolo.

Atendendo aos coeficientes de variação obtidos, os resultados são considerados amplamente satisfatórios. Quer a reprodutibilidade dos resultados do aparelho sobre um determinado tecido vegetal, quer a variabilidade entre plantas dentro da mesma unidade experimental é bastante aceitável. Em ensaios similares em sorgo (dados não publicados), não foram obtidos melhores resultados. Desta forma, a batateira não apresenta, à partida, dificuldades particulares no uso deste equipamento.

3.1.6.3 – Teste ao azoto inorgânico no solo em pré-cobertura

A partir do segundo ano de ensaio, foi incluído nos estudos o teor de azoto inorgânico do solo em pré-cobertura, já designado de *presidedress nitrate test*, PSNT (2.2.2.2). Este indicador procura relacionar a disponibilidade de azoto no solo durante a estação de crescimento com a necessidade de se aplicar azoto em cobertura. Os testes foram feitos próximos das três primeiras datas de avaliação do estado nutritivo das plantas e incidiram sobre as modalidades de fertilização de fundo.

Foi seguida a metodologia base de Magdoff *et al.* (1984), mas nas determinações incluiu-se o NH₄⁺. Eram colhidas quatro subamostras por unidade experimental até uma profundidade de 30 cm. As amostras assim formadas eram conduzidas, em sacos plásticos etiquetados, para laboratório, crivadas (2 mm) em fresco e congeladas de imediato.

Logo que possível, as amostras eram descongeladas e procedia-se à preparação dos extractos. Usavam-se 20,0 g de terra para 40 mL de uma solução de KCl 2 M. A mistura era agitada durante uma hora e centrifugada a 6000 rpm durante 10 minutos. Com uma pipeta retiravam-se 15 a 20 mL de extracto para copos de tampa roscada. Os extractos eram congelados até poderem ser analisados. A terra que restava era pesada e colocada a secar em estufa a 65 °C. Depois de seca, era de novo pesada para se determinar o teor de humidade.

Os extractos eram enviados para o laboratório de edafologia da UTAD, onde se determinava o azoto inorgânico. O ião NH₄⁺ foi determinado pelo método de Berthelot

(Houba *et al.*, 1989), com leitura dos extractos por espectrofotometria de absorção molecular, recorrendo a um analisador de fluxo segmentado. O processo de determinação do ião NO_3^- foi descrito em 3.1.6.2.1.3.

3.1.6.4 – Avaliação da produção e da qualidade dos tubérculos

A avaliação dos componentes da produção incidiu sobre amostras de dezoito plantas (seis em 1996). Elegiam-se as seis plantas centrais de cada linha, em três linhas dentro de cada microparcela. As dimensões das microparcelas asseguravam bordaduras adequadas. As plantas a arrancar eram previamente marcadas para evitar erros durante a colheita.

Um conjunto importante de determinações eram efectuadas em campo. Os tubérculos foram calibrados em malha quadrada nos calibres < 35, 35 – 65 e > 65 mm. Dentro de cada calibre os tubérculos eram contados e pesados. Na pesagem usava-se uma balança de cozinha de barras. A incidência de defeitos externos e a qualidade sanitária dos tubérculos era também analisada em campo. Avaliou-se o abrolhamento, o recrescimento, o esverdeamento, a presença de sarna vulgar e os estragos provocados por pragas. Para os três primeiros parâmetros contaram-se e pesaram-se os tubérculos com defeito na amostra inicial de dezoito plantas. Para a sarna vulgar utilizou-se a seguinte escala:

- 0 – ausência do defeito;
- 1 – incidência em tubérculos pontuais (feridas superficiais);
- 2 – alguns tubérculos afectados (feridas superficiais);
- 3 – bastantes tubérculos afectados (feridas profundas, desvalorização comercial evidente);
- 4 – grande proporção de tubérculos afectados;
- 5 – totalidade da produção afectada.

Para avaliar o efeito das pragas contaram-se os tubérculos atacados e estimou-se a perda de peso.

Após as determinações de campo, retirava-se uma amostra de 6 a 7 kg, representativa dos tubérculos de diâmetro superior a 35 mm. Estes tubérculos eram lavados em água corrente e colocados em sacos de rede. Esperava-se que escorressem e que a pele ficasse seca antes de serem encaminhados para laboratório.

A matéria seca era determinada numa amostra de 700 a 800 g de peso fresco. Os tubérculos eram cortados em palitos e colocados em estufa regulada para 65 °C. Pela perda de peso obtinha-se a percentagem de matéria seca. O material era depois moído e utilizado para a

determinação da percentagem de azoto e do teor de nitratos nos tubérculos. A percentagem de azoto nos tubérculos era determinada pelo método Kjeldhal, descrito em 3.1.6.2.1.1, e o teor de nitratos nos tubérculos pelo processo descrito em 3.1.6.2.1.3.

A gravidade específica foi determinada numa amostra de 3,63 kg de tubérculos frescos, pelo método de pesagem no ar e na água, utilizando um densímetro da *Zeal*. A dupla escala do densímetro fornece informação sobre a gravidade específica e sobre a percentagem de matéria seca nos tubérculos, estimada com base na gravidade específica.

Foi também determinada a cor das batatas após fritura, em amostras representativas das modalidades de fertilização do ensaio. Quatro tubérculos por amostra eram cortados ao meio no sentido longitudinal. De uma das metades de cada tubérculo retirava-se uma rodela de 2 mm de espessura para fritar. Na fritura utilizou-se óleo de soja aquecido a 180 °C. A fritura terminava quando o óleo deixava de borbulhar. O óleo em excesso nas batatas fritas era removido com papel absorvente. A cor das batatas fritas era avaliada por comparação com uma escala de cores desenvolvida pelo *Institute for Storage and Processing of Agricultural Produce*, na âmbito da *European Association for Potato Research*.

3.2 – Ensaio de campo com a cultura intercalar

Com a introdução da cultura intercalar, pretendeu-se estudar a sua capacidade em remover o azoto residual aplicado em excesso na cultura da batata e a recuperação do azoto mineralizado durante o período Outono/Inverno. Utilizou-se o tritcale (*Triticosecale* Wittm.), cv. Misionero. É um cereal de ciclo longo (outono/inverno) de grande desenvolvimento vegetativo e tolerante ao frio.

3.2.1 – Delineamento experimental

O ensaio foi instalado sobre o delineamento de fundo da cultura da batata. Utilizaram-se as microparcelsas que não tinham sido sujeitas à adubação azotada de cobertura, designadamente as microparcelsas das testemunhas do delineamento de cobertura e do ensaio de incubação *in situ*.

A área total disponível era dividida ao meio. Uma parte era mantida com plantas durante o Inverno e a outra ficava em solo nu. No total, eram constituídas 48 unidades

experimentais resultantes de três blocos, oito modalidades de fundo e duas modalidades de manutenção da superfície do solo.

3.2.2 – Técnica cultural

Depois da colheita das batatas, o terreno era preparado com escarificações cruzadas. A sementeira era feita a lanço, com um distribuidor centrífugo de adubo de tubo oscilante. As sementeiras ocorreram em 20 de Outubro de 1996, 23 de Janeiro de 1998 e 21 de Outubro de 1998, para os três anos de ensaio consecutivos.

Quatro a cinco semanas após a sementeira, quando as plantas semeadas e uma parte importante das infestantes tinham germinado, era aplicado um herbicida de contacto em metade da área de cada parcela, para constituir os tratamentos de solo nu. Utilizou-se um herbicida à base de glifosato (30,8 % equivalente de ácido de glifosato), com designação comercial de Herbex[®]. As caldas eram aplicadas com um pulverizador de dorso. Estas operações foram efectuadas em 15 de Novembro de 1996, 26 de Fevereiro de 1998 e 18 de Novembro de 1998.

No primeiro ano de ensaio (1996/97), dada a extrema secura da Primavera, efectuaram-se duas regas, para assegurar uma produção mínima de biomassa. As regas ocorreram a 4 e 17 de Abril e a dotação foi de 25 mm por rega. As restantes intervenções nos ensaios são incluídas no ponto seguinte, no âmbito das determinações.

3.2.3 – Determinações

3.2.3.1 – Azoto inorgânico residual em Outubro

Imediatamente após a colheita das batatas, retiravam-se amostras de terra sobre as modalidades de fertilização de fundo, nas microparcelsas em que não tinha sido aplicado azoto em cobertura. O objectivo era comparar o azoto inorgânico residual deixado pelas diferentes modalidades de fertilização de fundo da cultura da batata.

A terra era colhida para sacos plásticos etiquetados com uma sonda tipo trado. Constituíam-se duas amostras por unidade experimental em função da profundidade (0-30 e 30-60 cm). Cada amostra composta era constituída por quatro subamostras. As amostras eram conduzidas para o laboratório onde se procedia, de imediato, à sua crivagem (2 mm) antes de serem congeladas.

Quando possível, descongelavam-se as amostras e preparavam-se os extractos. O processo de preparação dos extractos e da determinação laboratorial do azoto inorgânico foram descritos em 3.1.6.3.

3.2.3.2 – Estado nutritivo das plantas durante o ciclo

No fim do Inverno era avaliado o estado nutritivo das plantas e estudada a sua relação com o azoto inorgânico residual no Outono. Como indicadores do estado nutritivo determinaram-se a percentagem de azoto e o teor de nitratos nas plantas. As datas de colheita de material vegetal foram em 13 de Fevereiro de 1997, 18 de Março de 1998 e 24 de Fevereiro de 1999. Pela escala de Zadoks *et al.* (1974) as plantas encontravam-se no estado fenológico 22 a 23, traduzível, genericamente, em caule principal mais 2 a 3 filhos.

Em cada unidade experimental eram colhidas, de forma aleatória, cerca de 80 plantas individuais. A colheita era feita a meio da manhã. As plantas eram cortadas a 1 cm acima da superfície do solo. As folhas mais velhas, que apresentavam partes senescentes, eram eliminadas. As amostras eram colocadas em sacos plásticos etiquetados, medidas em malas térmicas arrefecidas e conduzidas para laboratório.

As determinações laboratoriais incidiam sobre as plantas inteiras. As amostras eram divididas em duas partes. Numa determinava-se a percentagem de azoto total e na outra o teor de nitratos pelo método expedito. Ambas as metodologias já foram descritas para as folhas (3.1.6.2.1.1) e pecíolos (3.1.6.2.1.2) das batateiras, respectivamente. O teor de nitratos nas plantas do cereal era de tal maneira baixo que, mesmo preparando extractos pouco diluídos, era difícil obter leitura com o RQflex[®]. Na tentativa de ultrapassar esta dificuldade, a partir do segundo ano de ensaio, usaram-se tiras de teste que permitem leituras de extractos menos concentrados, na gama de 3 a 90 mg NO₃⁻ L⁻¹. Mesmo assim, não se conseguiu leitura em muitas amostras. No último ano, o teor de nitratos foi determinado pelo método laboratorial. O processo analítico já foi descrito para os pecíolos da batateira em 3.1.6.2.1.3.

3.2.3.3 – Corte da cultura intercalar

Após o espigamento faziam-se as colheitas finais para avaliar a biomassa produzida, a percentagem de azoto nas plantas e o azoto recuperado. As datas foram em 24 de Abril de 1997, 23 de Abril de 1998 e 28 de Abril de 1999.

Numa área de 2 m², sensivelmente a meio da microparcela, as plantas eram cortadas a 5 cm de altura do solo. De seguida eram atadas, etiquetadas e conduzidas para laboratório.

No laboratório começava-se por determinar o peso total das amostras. De seguida, era retirada uma subamostra representativa, com 500 a 1000 g de peso, e colocada a secar em estufa. Quando o peso estabilizava, as subamostras eram de novo pesadas para se obter a percentagem de matéria seca. Desta forma, era possível calcular a biomassa produzida na unidade de área. Na matéria seca determinava-se a percentagem de azoto nas plantas pelo método Kjeldhal. O azoto total recuperado pelas plantas era obtido a partir da biomassa e do seu teor em azoto.

3.2.3.4 – Azoto inorgânico residual em Abril

Após o corte do ferrejo eram retiradas amostras de terra em todas as unidades experimentais. Constituíam-se amostras de duas profundidades, 0-30 e 30-60 mm, compostas por quatro subamostras, incluindo as que permaneceram com plantas e em solo nu. As metodologias associadas à conservação das amostras, preparação dos extractos e determinação da concentração dos iões NH₄⁺ e NO₃⁻ nos extractos foram já anteriormente descritas.

3.3 – Métodos de incubação e extracção química

3.3.1 – Incubação *in situ*

O método de incubação *in situ* incidiu, apenas, sobre algumas modalidades de fertilização de fundo, concretamente sobre N_f0, N_f100, Eav, Ebo e RSU. Foram criadas microparcelas especialmente para o efeito, de forma a evitar-se o excesso de pisoteio inerente às entradas sucessivas nos ensaios.

No método de incubação *in situ* seguiu-se de perto a metodologia base de Hatch *et al.* (1990), excluído o uso de etileno. Após a plantação, eram enterrados dois frascos de vidro, de 1 L, na primeira linha de bordadura exterior aos talhões, em cada uma das modalidades de fertilização referidas e suas repetições. Apenas a abertura e o sistema de fecho eram deixados de fora. Em cada frasco colocavam-se três tubos de PVC (14 cm altura; 32 mm de diâmetro

interno) perfurados (16 orifícios de 5 mm de diâmetro por todo o perfil), cheios de terra. No total eram usados seis tubos de PVC por talhão, que formavam duas repetições (2 frascos) compostas por três subamostras (3 tubos).

A terra era obtida do interior dos talhões em três locais distintos. Em cada um desses locais enchiam-se dois tubos de PVC (um para cada frasco de vidro) e retirava-se terra para dois sacos plásticos que formavam as duas repetições onde se iria determinar o azoto mineral do solo no início do processo de incubação. Os tubos de PVC enchiam-se colocando uma das extremidades (afiada em bisel) contra o solo e aplicando pancadas ligeiras no lado oposto. Desta forma, conseguia-se um bom enchimento dos tubos com terra pouco perturbada. Para evitar a incidência directa dos raios solares, os frascos eram tapados com pratos plásticos brancos. A rega era sincronizada com o ensaio de incubação. A terra era colhida 48 horas depois da rega, assegurando-se um teor de humidade adequado nas terras a incubar e facilitando-se o enchimento dos tubos.

O processo era repetido com periodicidade aproximada de quinze dias. Esta metodologia sequencial permitia, por incubações sucessivas, avaliar a capacidade do solo em fornecer azoto durante todo o ciclo vegetativo e as suas variações ao longo da estação. A periodicidade quinzenal assegurava teores de humidade e arejamento adequados durante todo o período de incubação e evitava que se acumulassem produtos de reacção que interferissem com o processo de mineralização.

Nas terras resultantes de colheita directa ou sujeitas a incubação determinava-se o azoto inorgânico (NO_3^- e NH_4^+). O tratamento dado às amostras e o processo de determinação laboratorial já foram anteriormente descritos. A mineralização líquida era avaliada por diferença do azoto mineral no solo no início e no fim de cada período de incubação. O seu valor na estação de crescimento resultava do somatório do azoto mineralizado nos vários períodos de incubação.

3.3.2 – Métodos laboratoriais

A partir do segundo ano de ensaios, foram incluídos, nos estudos, métodos laboratoriais de determinação da disponibilidade biológica de azoto nos solos e de correctivos orgânicos. Foram ensaiados diversos tipos de incubações biológicas e métodos de extracção química. Os testes incidiram em misturas solo/fertilizante, respeitando as doses de azoto usadas nos ensaios de campo. As modalidades de fertilização utilizadas foram as mesmas referidas para os ensaios de incubação *in situ*, N_f0 , N_f100 , Eav, Ebo e RSU.

3.3.2.1 – Preparação das misturas solo/fertilizante

As terras eram colhidas após a preparação do terreno e da aplicação da fertilização fosfatada e potássica. Amostravam-se os 14 cm superficiais, respeitando a profundidade usada nos ensaios de incubação *in situ*. As terras eram crivadas (2 mm) e colocadas a secar ao ar em camadas finas para acelerar o processo.

Os correctivos orgânicos utilizados em campo eram também sujeitos a um processo de amostragem para determinações diversas. Amostras representativas de todos os fertilizantes eram secas em estufa (65 °C) e moídas. Uma das análises efectuadas consistia na determinação do azoto pelo método Kjeldhal. As misturas solo/fertilizante eram preparadas respeitando as doses de azoto usadas em campo, tendo por base a concentração em azoto dos fertilizantes. Para reforçar a protecção contra as alterações biológicas, as misturas eram congeladas após a sua preparação.

Os solos e os fertilizantes foram sujeitos a diversas determinações necessárias à implementação dos testes laboratoriais e à sua caracterização. Os resultados são apresentados nos anexos 7.3 e 7.5.

3.3.2.2 – Incubações biológicas aeróbias

3.3.2.2.1 – Incubação aeróbia com areia

As experiências de incubação seguiram, de perto, a versão original do método proposto por Keeney e Bremner (1967). Consistiram em misturar 10,0 g de solo seco (< 2 mm) com 30,0 g de areia de quartzo (850 a 250 μm) num frasco de boca larga, ao qual foram adicionados 6 mL de água. Os frascos eram selados com parafilme para evitar a dissecação. A incubação decorria durante 14 dias a 30 °C. A meio do período de incubação removia-se momentaneamente o parafilme para assegurar o arejamento.

O procedimento analítico de determinação de NO_3^- e NH_4^+ formados durante a incubação foi alterado. Keeney e Bremner (1967) propuseram a determinação por destilação do azoto inorgânico (NO_3^- , NO_2^- e NH_4^+), adicionando óxido de magnésio (MgO) e liga de Devarda. Nas nossas experiências, no fim do período de incubação, a mistura solo/areia era seca a 65 °C em estufa com ventilação forçada. De seguida, pesavam-se 20,0 g, adicionavam-se 40 mL de uma solução de KCl 2 M e agitava-se durante uma hora. Nos extractos, obtidos

por centrifugação (10 minutos a 6 000 rpm), determinavam-se o azoto inorgânico pelos métodos referidos em 3.1.6.2.1.3 e 3.1.6.3.

O azoto inorgânico inicial (sem incubação) obtinha-se adicionando 40 mL de uma solução de KCl 2 M a 20,0 g de terra. A preparação dos extractos e o processo de determinação dos iões era idêntico ao referido anteriormente. O azoto mineralizado era obtido subtraindo ao resultado da incubação o azoto mineral inicial.

3.3.2.2.2 – Incubação aeróbia com membranas de troca aniónica

Foram utilizadas membranas de troca aniónica BDH[®], comercializadas em placas de 125 x 125 mm, cortadas em tiras de 2 x 4 cm. As tiras de membrana eram colocadas a regenerar em 0,5 N de hidrogenocarbonato de sódio (NaHCO₃) durante a noite anterior à sua utilização.

Seguiu-se a metodologia de incubação base proposta por Qian e Schoenau (1995). Por razões relacionados com a dimensão dos frascos de incubação disponíveis, reduziu-se a quantidade de terra utilizada, designadamente passou-se dos 100 g propostos para 80 g. As tiras de membrana ficavam a incubar completamente inseridas na terra humedecida à capacidade de campo. Para facilitar o humedecimento inicial da terra, dividiam-se as tomas de solo e de água em três partes equivalentes e adicionavam-se alternadamente aos frascos de incubação onde se encontravam as tiras de membrana colocadas na vertical. A posição das membranas era marcada lateralmente no frasco para facilitar a sua posterior recuperação. O frasco era selado com parafilme. A incubação decorria durante 14 dias a 30 °C. Ao sétimo dia, o parafilme era momentaneamente removido e os frascos ligeiramente agitados para facilitar o arejamento. No fim do período de incubação retiravam-se as membranas com auxílio de uma pinça e lavavam-se com água destilada para retirar o excesso de solo. Os nitratos eram eluídos em 20 mL de HCl 0,5 M durante uma hora e quinze minutos. Os nitratos em solução foram analisados pelo método referido em 3.1.6.2.1.3 e expressos por centímetro quadrado de tira.

A concentração inicial de nitratos era obtida com uma hora de enterramento da tira, num procedimento idêntico ao método de incubação. O azoto mineralizado era dado pela diferença dos teores nos dois tempos considerados.

3.3.2.3 – Incubação biológica anaeróbia

Foi seguida de perto a variante de Keeney e Bremner (1966), recomendada pela Sociedade Americana de Agronomia (Keeney, 1982). Eram colocados 12,5 mL de água num

frasco de boca larga e adicionados 5,0 g de solo. Os frascos eram tapados com parafilme para evitar a dissecação e colocados a incubar durante 7 dias a 40 °C. No fim dos período de incubação a mistura era agitada e transferida para tubos de destilação usando 12 a 15 mL de uma solução de KCl 4 M para facilitar a transferência. Adicionavam-se aproximadamente 0,2 g de MgO e fazia-se a destilação do N-NH₃ da mistura.

Os valores iniciais de azoto amoniacal eram obtidos por processo idêntico excluía a incubação. Tal como nos métodos anteriores, o azoto mineralizado era obtido por diferença.

3.3.2.4 – Extracções químicas

3.3.2.4.1 – Método do autoclave

A variante mais divulgada do método do autoclave encontra-se descrita em Keeney (1982). Contudo, neste trabalho seguiu-se a versão proposta em Saint-Fort *et al.* (1990) em que o N-NH₄⁺ formado durante a autoclavagem se determina em autoanalisador e não por destilação.

Eram colocadas 10,0 g de solo em tubos de ensaio com capacidade para 50 mL e adicionados 25 mL de uma solução de CaCl₂ 0,01 M. A mistura era agitada e os tubos pesados. Antes de serem introduzidos no autoclave os tubos de ensaio eram tapados com folha de alumínio. A autoclavagem decorria a 121 °C durante 16 horas. De seguida, os tubos eram arrefecidos à temperatura ambiente e ajustado o peso inicial com água destilada. A mistura era agitada e depois centrifugada. O extracto era analisado para o NH₄⁺ pelo método descrito em 3.1.6.2.1.3.

A experiência era repetida sem autoclave para se obter o NH₄⁺ inicial. O NH₄⁺ formado durante a digestão em autoclave obtinha-se pela diferença dos dois valores.

3.3.2.4.2 – Solução salina de cloreto de potássio

O cloreto de potássio é o agente extractante usado em diversos métodos químicos encontradas na bibliografia. Neste trabalho seguiu-se de perto a variante proposta por Gianello e Bremner (1986 a).

Eram colocados 3,0 g de solo num tubo de digestão e adicionados 20 mL de uma solução de KCl 2 M. Os tubos eram tapados com folha de alumínio e colocados em estufa a 100 °C durante 4 horas. Já à temperatura ambiente, eram adicionados aproximadamente 0,2 g de MgO e determinava-se o N-NH₃ formado por destilação.

O azoto amoniacal inicial era obtido de forma idêntica com KCl a frio. O azoto libertado devido ao tratamento térmico obtinha-se pela diferença das duas determinações.

3.3.2.4.3 – Solução tampão de fosfato/borato

Repetiu-se na integra o método introduzido por Gianello e Bremner (1986 b; 1988). Pesavam-se 4,0 g de solo para tubos de digestão e adicionavam-se 40 mL de uma solução tamponizada de fosfato de sódio e borato de sódio. A mistura era destilada directamente.

O tampão era preparado adicionando 200,0 g de tri-sódio fosfato dodecahidrato ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) e 50,0 g de tetraborato de di-sódio decahidrato ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) a cerca de 1800 mL de água num balão de 2 L. O pH era ajustado a 11,2 adicionando ácido ortofosfórico (H_3PO_4). De seguida diluía-se até dois litros e armazenava-se hermeticamente.

Como referência (valores iniciais) utilizaram-se os resultados do método anterior do KCl a frio. O efeito do tampão de fosfato/borato era obtido por subtracção dos valores do método de referência.

3.3.2.4.4 – Azoto total

O azoto total nas misturas solo/fertilizantes foi determinado pelo método Kjeldhal. O processo foi já descrito em 3.1.6.2.1.1 para a determinação da percentagem de azoto total nas folhas.

3.3.2.5 – Miscelânea

De todos os métodos de incubação e extracção química foram apresentados os resultados segundo duas variantes. Uma delas, já definida, envolveu sempre a subtracção do azoto inicial determinado num procedimento de referência. A outra consistiu na utilização directa dos resultados dos métodos propriamente ditos.

A estratégia teve por base o facto de nalguns estudos (p. ex. Jalil *et al.*, 1996; Campbell *et al.*, 1997) se ter verificado que, quando não se tinha em conta o azoto obtido no procedimento de referência, a correlação com o azoto exportado pelas culturas melhorava.

Para o método de incubação anaeróbia foi constituída uma terceira variante, que consistiu na destilação do N-NH_3 não das misturas solo/solução mas sim de extractos obtidos a partir delas.

A destilação directa da suspensão solo/solução dá valores muito elevados, pela hidrólise de azoto dos compostos orgânicos que ocorre devido à elevação do pH (9,9 a 10,7) durante a fervura na presença de MgO (Robinson, 1967; Stanford e DeMar, 1970). Como continua por esclarecer se o azoto orgânico que se hidrolisa tem significado biológico, decidiu-se incluir nos estudos a variante da destilação do extracto. Assim, foi repetida a incubação utilizando água e solo em quantidades superiores para assegurar um volume aceitável de extracto. Utilizaram-se 25 mL de água e 10,0 g de solo. No fim do período de incubação, a mistura era agitada e transferida para tubos de centrífuga usando uma solução de KCl 4 M. Após centrifugação, recuperavam-se 12,5 mL de extracto que se destilava na presença de MgO.

3.4 – Tratamento estatístico e apresentação dos resultados

Na análise dos resultados foi usado o programa estatístico Systat 5.02.

Os principais tratamentos estatísticos consistiram em análises de variância e ajustamentos de modelos teóricos a nuvens de pontos. Em situações pontuais ensaiou-se o teste do χ^2 e determinaram-se alguns elementos de estatística descritiva.

Na análise de variância considerou-se a probabilidade de 95 % ($\alpha < 0,05$) para identificar diferenças com significado estatístico. Na comparação múltipla de médias usou-se o teste Fisher's LSD com igual nível de significância.

4 – Resultados e discussão

4.1 – Efeito do azoto na produção de tubérculos

4.1.1 – Selecção da curva de resposta à fertilização azotada

A curva que melhor traduz a relação entre o azoto aplicado como fertilizante e a produção de tubérculos parece depender das condições experimentais e das cultivares, tal como foi referido em 2.4.2.4. A função quadrática, na forma $y = b_0 + b_1N + b_2 N^2$, tem sido a mais utilizada. Esta curva tem, a seu favor, o facto de apresentar ponto de viragem, aspecto normalmente bem aceite do ponto de vista biológico. Contudo, pelo facto de ser simétrica, tende a sobrestimar a produção máxima e a subestimar a produção correspondente às baixas e elevadas doses de azoto (Neeteson e Wadman, 1987). Os modelos exponenciais assintóticos têm, a seu favor, o facto de traduzirem o extenso patamar que por vezes se forma, em que a produção de tubérculos não decresce mesmo para doses bastante elevadas de azoto. Contudo, este tipo de curva tende a sobrestimar a necessidade de fertilizante para níveis elevados de produção (Coutinho, 1989).

Neeteson e Wadman (1987) encontraram bons resultados utilizando um modelo exponencial modificado pela introdução de um termo linear. A função apresenta-se na forma $y = b_0 + b_1N + b_2 e^{aN}$ e adquire flexibilidade para apresentar ponto de viragem ou traduzir o extenso patamar característico da resposta da cultura ao azoto aplicado.

Na figura 10 exemplifica-se com resultados de campo o ajustamento dos dois principais modelos concorrentes: a função quadrática; e a função exponencial modificada desenvolvida por Neeteson e Wadman (1987). Para alargar a gama das doses utilizadas, os dados incluem o azoto total aplicado, independentemente da época de aplicação, e referem-se ao ensaio de 1998, no qual se aplicaram doses até 500 kg N ha⁻¹ (300 e 200 unidades em fundo e cobertura, respectivamente) contra apenas 400 kg N ha⁻¹ nos anos anteriores.

Atendendo à distribuição dos pontos observados (figura 10) parece que, nestas condições, o modelo exponencial modificado traduz melhor a resposta da cultura à aplicação de doses crescentes de azoto. As equações matemáticas do modelo exponencial modificado para os três anos de ensaio, bem como os seus coeficientes de determinação, são:

$$y_{(1996)} = 760,610 - 0,473 N - 718,928 \text{ EXP}(-0,0008 N); R^2 = 0,84;$$

$$Y_{(1997)} = 41,687 + 0,026 N - 18,192 \text{ EXP}(-0,0184 N); R^2 = 0,98; e$$

$$Y_{(1998)} = 47,293 + 0,002 N - 14,788 \text{ EXP}(-0,0184 N); R^2 = 0,80.$$

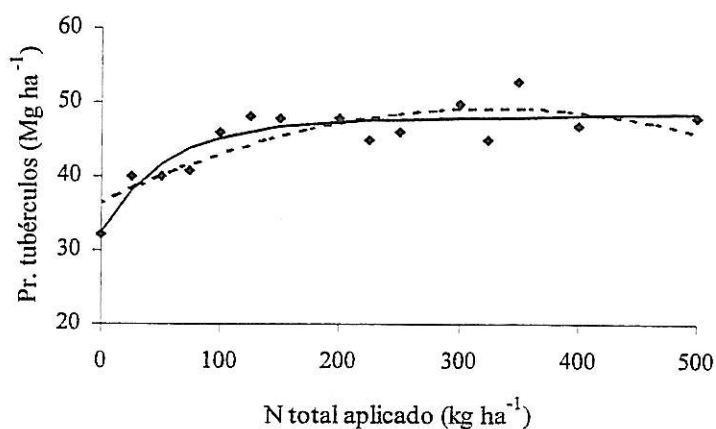


Figura 10 – Produção comercial de tubérculos em função do azoto total aplicado: — modelo exponencial modificado; ---- modelo quadrático. Dados de 1998.

O modelo exponencial modificado apresenta também vantagens estatísticas relativamente ao modelo quadrático. No quadro 4 compara-se a soma dos quadrados dos resíduos das equações concorrentes.

Quadro 4 – Soma dos quadrados dos resíduos após ajustamento do modelo exponencial modificado e do modelo quadrático.

Ano	Exponencial modificado	Quadrático
1996	34,959	34,623
1997	20,335	58,546
1998	69,252	106,347
total	128,128	199,516

A análise do posicionamento das observações relativamente aos valores estimados pela função exponencial modificada (figura 11) parece não deixar dúvidas que, independentemente da qualidade do ajustamento, este modelo traduz adequadamente o fenómeno real.

Atendendo às considerações anteriores, o modelo exponencial modificado será utilizado para avaliar a resposta das plantas ao azoto aplicado em fundo e em cobertura, designadamente na determinação da dose óptima de azoto e da produção correspondente. Os elementos matemáticos suplementares que permitem a implementação do modelo são apresentados no anexo 7.16.2.

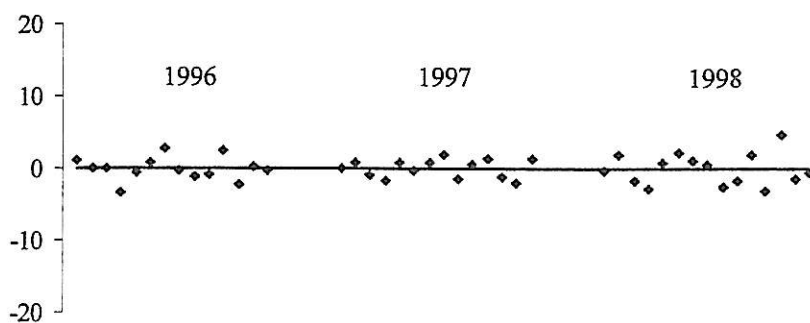


Figura 11 – Posição dos resíduos resultantes do ajustamento pela exponencial modificada.

4.1.2 – Resposta ao azoto aplicado em fundo

Na figura 12 apresentam-se as equações e o grau de ajustamento que traduzem a relação entre o azoto aplicado em fundo e a produção de tubérculos, excluídas as modalidades de fertilização com correctivos orgânicos e as modalidades de cobertura. Pela análise de variância (anexo 7.15.1), a resposta ao azoto aplicado foi estatisticamente significativa com uma probabilidade superior a 99 % em 1997, 95 % em 1998 e de 90 % em 1996.

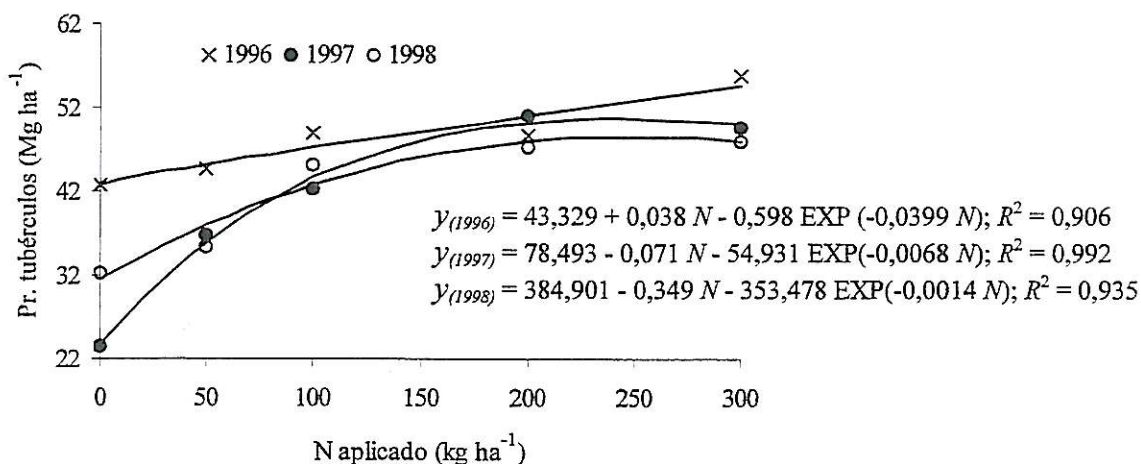


Figura 12 – Resposta ao azoto aplicado em fundo.

Com base nas equações propostas, foi determinada a dose óptima de azoto (N_{op}) em fundo, a produção mínima (correspondente às modalidades testemunha), a produção técnica

óptima e o máximo físico. A dose óptima foi calculada pela expressão (Neeteson e Wadman, 1987)

$$N_{op} = \ln [(P-b_1)/ab_2]/a,$$

deduzida da equação exponencial modificada $y = b_0 + b_1N + b_2e^{aN}$, quando $\delta y/\delta N = P$, em que a , b_1 e b_2 são os coeficientes estimados pelos dados experimentais e P a razão entre o preço da unidade de azoto e de uma tonelada de tubérculos. A unidade de azoto na forma de ureia tem um custo de mercado aproximado de 100\$00. No valor atribuído à batata consideraram-se três preços (10, 20 e 30\$00 kg⁻¹), que representam os limites de comercialização em anos de mau e bom escoamento. A produção mínima e óptima foram obtidas nos pontos correspondentes a $N = 0$ e $N = N_{op}$, respectivamente. O máximo físico foi obtido para $\delta y/\delta N = 0$. Quando a curva não apresenta ponto de viragem, o máximo físico é o ponto correspondente à dose mais elevada de azoto utilizada. No quadro 5 são apresentados os resultados.

Quadro 5 – Pontos característicos das curvas de ajustamento.

Ano	Dose óptima			Prod. mínima (Mg ha ⁻¹)	Prod. téc. Óptima			Máximo físico (Mg ha ⁻¹)
	(10\$)	(20\$)	(30\$)		(10\$)	(20\$)	(30\$)	
	(kg ha ⁻¹)				(Mg ha ⁻¹)			
1996	300	300	300	42,73	54,73	54,73	54,73	54,74
1997	225	234	237	23,56	50,62	50,69	50,70	50,72
1998	229	239	243	31,42	48,46	48,53	48,55	48,56

A dose óptima de azoto foi sempre superior a 200 kg ha⁻¹. O resultado traduz, à partida, a reduzida disponibilidade natural de azoto no solo. Este efeito foi, em parte, forçado pelas metodologias associadas aos ensaios de campo (3.1.5.1). Porter e Sisson (1991 b), em condicionalismo de menor potencial produtivo (35 a 45 ton. de tubérculos ha⁻¹) e diferentes cultivares (R. burbank e Shepody), encontraram valores óptimos de azoto idênticos a estes, a variar entre 146 e 288 kg ha⁻¹. Contudo, a comparação de resultados de experiências que decorrem em condições particularmente diferentes faz pouco sentido. Refira-se que Neeteson e Wadman (1987), utilizando os resultados de 99 experiências por toda a Holanda, verificaram que a dose óptima variou de 0 a 400 kg N ha⁻¹. Os factores de variação mais decisivos são, normalmente, a disponibilidade natural de azoto no solo e o potencial produtivo da região.

A produção correspondente ao máximo físico situou-se em 54,74, 50,72 e 48,56 Mg ha⁻¹ para 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Em Portugal os resultados da produtividade da

cultura em ensaios de campo têm sido muito variados. Em Vila Real, na modalidade mais produtiva, Castro (1988) obteve 20 e 24 Mg ha⁻¹ nas cv. Kennebec e Désirée, respectivamente. Mais tarde, Castro (1994) publica produções para a Kennebec de 20 e 30 Mg ha⁻¹ e para a Désirée de 24 e 43 Mg ha⁻¹ para os anos de ensaio de 1986 e 1987, respectivamente. Martins (1990), também em Vila Real, registou como produções máximas 37,0 e 36,5 Mg ha⁻¹ para a Kennebec e 50,5 e 45,5 Mg ha⁻¹ para a Désirée nos anos de 1986 e 1987, respectivamente. Almeida (1995), em estudos com quatro cultivares de indústria, obteve produtividades compreendidas entre 28 e 38 Mg ha⁻¹, dependendo da cultivar e do ano de ensaio. Com a cv. Spunta, em cultura para primores, foram obtidas em Lisboa, valores de 25,5 Mg ha⁻¹ (Coelho, 1992) e 22,8 Mg ha⁻¹ (Nunes, 1992). Também com a cv. Spunta, em ensaios na região Oeste, Lopes (1989) atingiu uma produtividade de 49,8 Mg ha⁻¹. Rodrigues (1995) obteve 32,9 Mg ha⁻¹ em Bragança, na modalidade mais produtiva, utilizando a cv. Stemster. A comparação entre a informação disponível para o país e os bons resultados agora obtidos permite, antes de mais, validar a técnica cultural utilizada.

A produção técnica óptima foi diferente nos três anos de ensaio (quadro 5). As diferenças poderão ser justificadas com base na temperatura do ar. Parece haver uma relação directa entre a temperatura excessiva e a quebra de produtividade. A média semanal das temperaturas máximas foi superior a 30 °C em 3, 4 e 6 semanas em 1996, 1997 e 1998, respectivamente (figura 4). Em 1998 registou-se, também, o valor mais elevado das máximas semanais (35,1 °C, na segunda semana de Agosto). As máximas absolutas (diárias) atingiram os valores de 34,2, 35,0 e 36,5 °C para a sequência cronológica dos anos de ensaio.

Nas modalidades testemunha, a produção foi mais elevada em 1996, relativamente aos anos seguintes (quadro 5). Em 1997 foi particularmente baixa. O resultado pode ser explicado pela menor disponibilidade natural de azoto no solo. A determinação do azoto mineral inicial (anexo 7.12) não dá essa indicação. Contudo, na análise dos indicadores do estado nutritivo (4.4.2.1), na determinação do azoto mineral no solo durante o ciclo (4.4.2.4) e os resultados da incubação *in situ* (4.6.2.3) sugerem evidência clara nesse sentido.

O preço da batata exerceu um efeito pouco significativo no cálculo da dose óptima de azoto e da produção técnica óptima. Por outro lado, a produção máxima pouco deferiu da produção técnica óptima (quadro 5). Estes resultados devem-se a duas razões principais: (i) resposta em patamar, com aumento muito suave da produção de tubérculos até doses de azoto elevadas; e (ii) reduzido significado do preço do fertilizante relativamente ao valor da produção. Este resultado é comum na cultura da batata e contribui de forma decisiva para a

tendência generalizada de se exagerarem as quantidades a aplicar (Harris, 1992; MacKerron *et al.*, 1993).

4.1.3 – Resposta aos fertilizantes orgânicos

A produção de tubérculos nas modalidades referentes aos correctivos orgânicos é apresentada na figura 13, a par da curva de resposta às modalidades fertilizadas com ureia.

Os resultados mostram que os correctivos orgânicos apresentaram produções equivalentes aos da modalidade testemunha e da modalidade N_f50, excepção feita ao ensaio de 1996, em que a utilização do estrume de aviário produziu um resultado idêntico à modalidade N_f100.

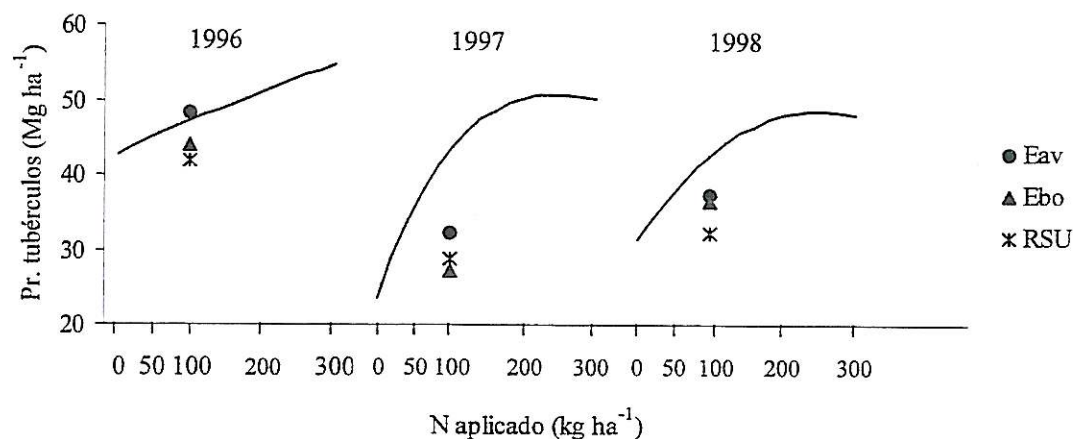


Figura 13 – Resultados dos fertilizantes orgânicos relativamente à ureia.

O estrume de aviário originou melhores resultados, em qualquer dos anos de ensaio, que os restantes correctivos orgânicos, apesar das diferenças não terem significado estatístico. Este fertilizante apresentava na sua composição teores em azoto total substancialmente mais elevados que os restantes materiais orgânicos. A concentração de azoto na matéria seca era de 40, 35 e 30 g kg⁻¹ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. O teor em azoto do estrume de bovino e do RSU situou-se em valores compreendidos entre 12 e 18 g kg⁻¹ (anexo 7.4). A par da elevada concentração em azoto, o estrume de aviário apresentava menor razão C/N. Cálculos efectuados com base no carbono facilmente oxidável permitiram obter valores de razão C/N de 4,7, 6,9 e 7,6 em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Os resultados para o estrume de bovino variaram entre 10,2 e 11,8 e para o RSU variaram entre 12,1 e 21,3.

O efeito mais favorável do estrume de aviário pode ser justificado pela maior disponibilidade de azoto durante o curto período de absorção activa das plantas e permite

concluir que a libertação de azoto deverá ter sido o principal efeito benéfico na produção de tubérculos atribuível aos estrumes. O comportamento bastante modesto do estrume de bovino e do RSU relativamente à produção de tubérculos, não permite atribuir aos correctivos orgânicos qualquer efeito benéfico na produção pela melhoria das condições físicas e biológicas do solo. Estes aspectos merecem particular atenção em culturas de ciclo curto, em que a eficiência de uso do azoto dos correctivos orgânicos pode ser particularmente baixa.

4.1.4 – Resposta ao azoto aplicado em cobertura

Os resultados da análise de variância identificaram a existência de interacção significativa entre as modalidades de fertilização de cobertura e de fundo para o ano de 1998. Em 1996 e 1997, este efeito não é tão evidente, sendo a probabilidade associada à interacção de 0,059 e 0,108, respectivamente (anexo 7.15.1). Esta diferença justifica-se pelo facto de em 1996 e 1997, a modalidade N_c200 não ter sido incluída sobre as modalidades de fundo N_f200 e N_f300 em campo (3.1.4). Este aspecto foi decisivo na medida em que, para as modalidades em que foi aplicado pouco azoto em fundo, a cobertura com 200 kg ha^{-1} , efectuada em 1998, ainda permitiu acréscimos na produção. A existência de interacção significa que a resposta à adubação de cobertura dependeu da fertilização de fundo.

O efeito é claramente demonstrado pela figura 14. Para as modalidades de fundo que disponibilizaram menos azoto para as plantas, designadamente N_f0 , N_f50 , Eav, Ebo e RSU, a produção de tubérculos aumentou significativamente com o azoto aplicado em cobertura. Para as modalidades de fundo que disponibilizaram, desde logo, muito azoto, designadamente N_f200 e N_f300 , a resposta à adubação de cobertura não conduziu a diferenças significativas (equações lineares em que o declive não diferiu significativamente de zero). As equações referentes aos ajustamentos da figura 14 e os coeficientes de determinação associados encontram-se no anexo 7.16.1.

No quadro 6 apresentam-se as doses de azoto óptimas em cobertura e a produção correspondente em função das modalidades de fundo. Os valores resultaram de cálculos efectuados sobre os modelos de ajustamento da figura 14, admitindo a relação entre preços da unidade de azoto e da produção anteriormente referida. Os cálculos para os ajustamentos pela exponencial modificada são idênticos aos que foram apresentados para as modalidades de fundo. Para as equações lineares (modalidades N_f200 e N_f300), considerou-se sempre como dose óptima de cobertura 0 kg N ha^{-1} , já que o declive não foi estatisticamente diferente de zero para qualquer dos anos de ensaio.

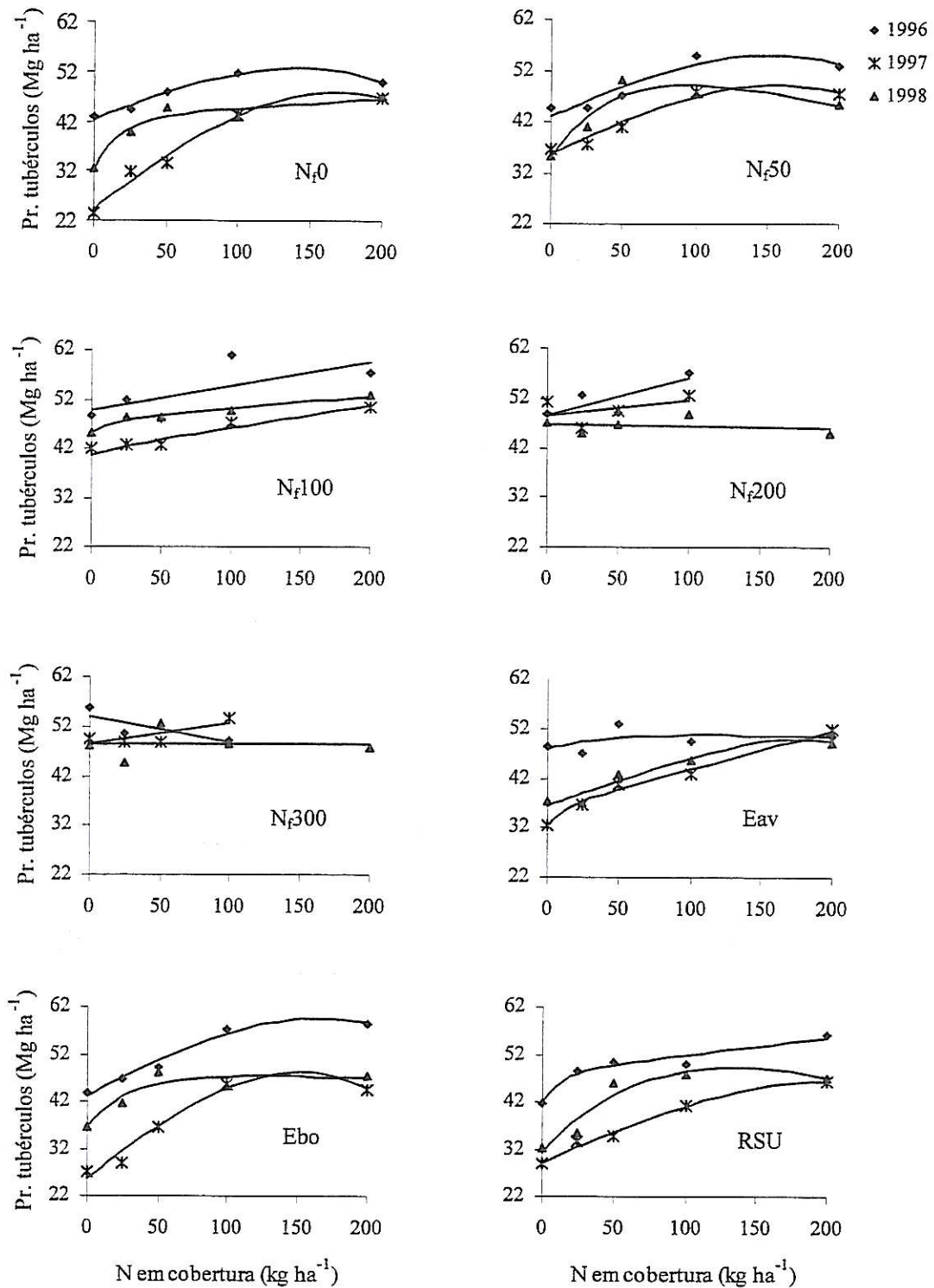


Figura 14 – Resposta ao azoto aplicado em cobertura para as diferentes modalidades de fertilização de fundo.

Para as modalidades em que foi aplicado mais azoto em fundo, foram calculadas doses óptimas de cobertura mais baixas e vice-versa (quadro 6). A dose óptima em cobertura

calculada para as modalidades N_f200 e N_f300 foi de 0 kg N ha⁻¹. Para a modalidade N_f100 as doses ótimas em cobertura foram superiores ao que seria de esperar. O resultado só pode ser justificado pelas dificuldades impostas pela cultura. Numa cultura em que a produção pode aumentar suave e indefinidamente com o azoto aplicado, e em que a razão entre o preço do fertilizante e o valor da produção é muito baixa, pode acontecer que a dose ótica seja, matematicamente, obtida em infinito, aqui ajustada para 200 kg N ha⁻¹ (dose máxima utilizada em cobertura). Por outro lado, a elevada variabilidade experimental associada a esta cultura, que levou a que Neeteson e Wadman (1987) tenham verificado que na Holanda o intervalo de confiança ($p > 95 \%$) para a dose ótica de azoto tenha sido de 300 kg N ha⁻¹ em 60 % das experiências, terá contribuído para a menor coerência do resultado. Contudo, ele é assumido e será usado, tal como foi calculado, em 4.4.6 na quantificação do nutriente a aplicar em cobertura.

Quadro 6 – Dose de azoto ótica em cobertura e produção correspondente, em função da fertilização de fundo.

Ano	Modalidades de fundo					Eav	Ebo	RSU
	N _f 0	N _f 50	N _f 100	N _f 200	N _f 300			
	Dose ótica de N em cobertura (kg ha ⁻¹)							
1996	141	152	152	0	0	97	166	200
1997	167	157	200	0	0	200	152	197
1998	200	94	200	0	0	176	112	132
média	169	134	184	0	0	158	143	176
	Produção de tubérculos correspondente à dose ótica em cobertura (Mg ha ⁻¹)							
1996	52,6	55,0	59,6	48,6	54,2	50,7	59,6	55,5
1997	47,9	49,1	50,8	48,4	48,4	51,6	48,3	46,4
1998	46,5	49,1	52,6	46,8	48,3	50,0	47,3	49,2
média	49,0	51,1	54,3	47,9	50,3	50,7	51,7	50,4

A produção correspondente à dose ótica em cobertura assume valores entre 46,4 e 59,6 Mg ha⁻¹. Esta diferença aparentemente considerável é atribuída às limitações metodológicas atrás referidas. Não nos parece evidente qualquer tendência que demonstre que as aplicações de fundo e cobertura tenham tido eficiência diferente na produção de tubérculos.

4.2 – Efeito do azoto na qualidade dos tubérculos

4.2.1 – Calibre, matéria seca e nitratos nos tubérculos

O efeito do azoto aplicado em fundo na obtenção de tubérculos grandes, na percentagem de matéria seca e no teor de nitratos nos tubérculos é apresentado no quadro 7. Nos quadros 8 e 9 são apresentados os resultados dos mesmos parâmetros, respectivamente para as modalidades de fertilização de cobertura e para o azoto total aplicado, independentemente da época de aplicação.

No quadro 7, as modalidades de correctivos orgânicos foram excluídas dos modelos de ajustamento, para se estudar o efeito do azoto aplicado na forma de ureia. Aquelas modalidades foram colocadas em separado para efeitos comparativos.

Quadro 7 – Efeito da fertilização de fundo na % de tubérculos grandes, na % de matéria seca e na concentração de nitratos nos tubérculos.

Modalidades de fundo	Calibre > 65 mm (%)			% matéria seca			N-NO ₃ ⁻ tub. (mg kg ⁻¹)
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1998
N _f 0	21,8	0,0	1,5	21,9	20,9	20,2	20,5
N _f 50	36,4	7,9	5,1	24,0	20,9	21,4	45,8
N _f 100	32,8	7,1	16,6	23,6	20,5	21,3	40,0
N _f 200	31,9	4,1	18,1	22,3	21,3	21,8	50,4
N _f 300	17,2	8,4	14,4	21,8	18,5	19,9	65,5
Ajustamento	ns	ns	Q	ns	ns	Q	L
Coef. deter. (R ²)			0,92			0,83	0,82
Eav	8,7	3,4	7,8	24,1	21,1	20,3	24,8
Ebo	12,6	2,3	4,0	22,4	19,0	19,8	31,5
RSU	17,1	0,0	1,4	23,1	19,8	19,9	25,6

Q – quadrático; L – linear; ns – não significativo.

O efeito do azoto, na forma de ureia, na produção de tubérculos grandes foi traduzido por uma equação quadrática para os dados de 1998, quer para as aplicações em fundo (quadro 7), em cobertura (quadro 8) ou para o azoto total aplicado (quadro 9). A função quadrática também se ajustou significativamente aos dados de 1997 para as aplicações de azoto em cobertura (quadro 8). Para os restantes anos e épocas de aplicação não foi possível ajustar qualquer modelo matemático de forma significativa.

Quadro 8 – Efeito da fertilização de cobertura (sobre N_f0) na % de tubérculos grandes, na % de matéria seca e na concentração de nitratos nos tubérculos.

Modalidades de fundo	Calibre > 65 mm (%)			% matéria seca			N-NO ₃ ⁻ tub. (mg kg ⁻¹)
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1998
N _c 0	21,8	0,0	1,3	21,9	20,9	20,2	20,5
N _c 25	27,1	1,3	11,7	22,0	21,4	21,6	33,8
N _c 50	29,4	6,6	7,8	23,0	21,7	20,9	90,5
N _c 100	24,0	9,5	17,8	20,7	21,2	20,3	103,6
N _c 200	33,7	11,6	20,0	22,7	22,0	21,3	59,3
Ajustamento	ns	Q	Q	ns	ns	ns	L*
Coef. deter. (R ²)		0,97	0,85				0,85

Q – quadrático; L – linear (* significativo se excluída a modalidade N_c200); ns – não significativo.

Quadro 9 – Efeito do azoto total (fundo + cobertura) na % de tubérculos grandes, na % de matéria seca e na concentração de nitratos nos tubérculos.

N aplicado (kg ha ⁻¹)	Calibre > 65 mm (%)			% matéria seca			N-NO ₃ ⁻ tub. (mg kg ⁻¹)
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1998
0	21,8	0,0	1,3	21,9	20,9	20,2	20,5
25	27,1	1,4	11,7	22,0	21,4	21,6	33,8
50	32,9	7,2	6,5	23,5	21,3	21,2	53,1
75	28,4	6,8	11,2	23,1	20,6	21,2	35,7
100	27,7	7,2	18,8	22,4	20,7	20,9	55,7
125	15,0	6,9	14,2	23,2	20,9	21,3	54,4
150	21,9	6,8	22,9	22,5	20,4	20,9	66,4
200	28,3	7,0	21,1	22,7	21,1	21,2	53,8
225	32,9	5,3	22,2	22,6	20,6	20,2	70,9
250	36,0	9,2	22,7	22,5	20,1	20,7	86,2
300	24,9	7,4	16,5	21,9	19,8	20,5	78,3
325	17,6	11,7	22,4	22,7	19,3	20,4	120,3
350	25,8	7,8	27,4	21,6	19,8	19,9	81,0
400	36,0	12,8	25,0	22,0	20,9	19,7	89,3
500			21,1			19,5	80,9
Ajustamento	ns	ns	Q	Q	L	Q	L
Coef. deter. (R ²)			0,79	0,35	0,41	0,69	0,66

Q – quadrático; L – linear; ns – não significativo.

A informação disponível de outros investigadores sobre a relação entre a dose de azoto e a proporção de tubérculos grandes não é mais esclarecedora. Porter e Sisson (1991 b),

utilizando a cv. R. Burbank e a cv. Shepody, em ensaios durante vários anos, encontraram um predomínio de relações quadráticas, algumas relações lineares e também relações não significativas. Diversos investigadores referem que a proporção de tubérculos grandes aumenta de forma significativa com a dose de azoto, enquanto outros não registaram aumentos significativos. O assunto foi revisto em 2.4.3.

A dificuldade em encontrar respostas idênticas entre investigadores pode significar que existem outros factores a exercer um efeito decisivo na dimensão dos tubérculos, tais como a densidade de plantação (Rodrigues *et al.*, 1997) ou a utilização de propágulos de diferente tamanho (Rodrigues e Sanches, 1998). Se forem comparados os resultados dos diferentes anos, verifica-se que a proporção de tubérculos grandes foi mais elevada em 1996. O facto de se ter utilizado batata/semente de menores dimensões nesse ano (3.1.5.4), apresenta-se como o principal argumento para justificar os resultados.

Os correctivos orgânicos produziram resultados em que a proporção de tubérculos grandes foi relativamente baixa (quadro 7). Os resultados justificam-se pela reduzida disponibilidade de azoto para as plantas nestas modalidades.

A relação entre o azoto aplicado e a percentagem de matéria seca nos tubérculos variou em função do ano de ensaio e da época de aplicação. Com a adubação de fundo apenas em 1998 foi encontrado um ajustamento significativo, designadamente com a equação quadrática (quadro 7). Em 1996 observou-se também uma tendência quadrática, embora não significativa ($R^2 = 0,56$; $p = 0,15$). A adubação de cobertura não influenciou de forma significativa a percentagem de matéria seca nos tubérculos (quadro 8). Quando a relação se estabeleceu entre o azoto total aplicado e a percentagem de matéria seca nos tubérculos foram encontrados ajustamentos significativos, designadamente com equações quadráticas em 1996 e 1998 e com uma equação linear decrescente em 1997 (quadro 9).

Na bibliografia é possível encontrar resultados que denotam decréscimos de matéria seca com a dose de azoto, acréscimos para doses de azoto muito moderadas e depois decréscimos e ausência de efeito significativo (2.4.3). Calculando a dose óptima de azoto que maximiza a percentagem de matéria seca a partir das equações quadráticas ajustadas, verifica-se que, em 1998, a dose óptima em fundo seria de 138 kg N ha^{-1} , enquanto em 1996 e 1998 a quantidade total de azoto que maximizaria a percentagem de matéria seca nos tubérculos seria de 150 e 38 kg N ha^{-1} , respectivamente. Quando o ajustamento não é significativo ou é linear decrescente, fica implícito que a dose óptima de azoto é 0 kg N ha^{-1} . Em qualquer das situações, as doses de azoto que maximizam a produção total foram superiores a estes valores (quadros 5 e 6). Atendendo a este resultado, parece ser impossível definir, em simultâneo,

como objectivo para a cultura maximizar a produção e a percentagem de matéria seca nos tubérculos. Esta observação tinha já sido feita por Porter e Sisson (1991 b) e Rodrigues *et al.* (1998 b).

O teor de nitratos nos tubérculos evoluiu de forma linear com o azoto aplicado em fundo (quadro 7), em cobertura (quadro 8) e com o azoto total aplicado independentemente da época de aplicação (quadro 9). Em campo, é normalmente este o tipo de resultado que se encontra (Carter e Bosma, 1974; Mondy *et al.*, 1986) se forem excluídas situações pontuais em que se conjuguem azoto em excesso com situações de *stress* hídrico, que podem originar aumentos drásticos nos teores de nitratos nos tubérculos (Augustin *et al.*, 1977; McDole e McMaster, 1978). Utilizando soluções nutritivas, Mühling *et al.* (1994) também registaram aumentos muito elevados no teor de nitratos nos tubérculos para as maiores doses de azoto. Em termos relativos, os teores de nitratos presentes nos tubérculos (inferiores a 120 mg kg⁻¹) são baixos, se comparados com os valores registados para a mesma cultura pela maioria dos autores anteriormente citados.

4.2.2 – Cor após fritura

Em 1997 e 1998 determinou-se a cor das batatas às rodelas após fritura. Os resultados obtidos encontram-se no anexo 7.9. Em todas as determinações efectuadas foram obtidos valores compreendidos entre 5 a 7 da escala de cores utilizada. Os resultados foram idênticos nos dois anos de ensaio. Não foi possível estabelecer qualquer relação com a quantidade de azoto aplicado em fundo, em cobertura ou com o azoto total. Também Guarda *et al.* (1994) e Almeida (1995) não registaram qualquer efeito na cor das batatas fritas pela utilização de diferentes doses de azoto.

4.2.3 – Defeitos externos

4.2.3.1 – Abrolhamento, recrescimento e esverdeamento

A proporção de tubérculos abrolhados foi insignificante, em número médio inferior a 1 ‰ (anexo 7.9). Os tubérculos abrolhados eram de pequenas dimensões, normalmente dentro do calibre < 35 mm. O seu significado prático foi reduzido e idêntico em qualquer dos anos de ensaio. Não foi possível estabelecer qualquer relação com as modalidades de fertilização.

O recrescimento envolveu, em termos médios, menos de 1% dos tubérculos e menos de 2% da produção em peso fresco (anexo 7.9). O fenómeno incidiu sobre tubérculos de dimensões médias a grandes, daí a maior importância relativa em peso fresco que em número de tubérculos. Apesar das aplicações de azoto em cobertura potenciarem a importância do recrescimento (Roberts *et al.*, 1982), não foi encontrada qualquer relação com as modalidades de fertilização. Também Lauer (1986 b) e Almeida (1995) não registaram qualquer efeito do azoto na regularidade dos tubérculos. Este resultado valida, de certa forma, a qualidade da rega, já que, em campo, é um fenómeno associado sobretudo a variações na disponibilidade de água durante a fase de engrossamento dos tubérculos (Epstein e Grant, 1973).

Em 1996, o esverdeamento ocorreu em número de tubérculos inferior a 1% (anexo 7.9). Os tubérculos afectados eram, normalmente, de dimensões pequenas a médias e encontravam-se expostos à luz no momento da colheita. Não foi encontrada qualquer relação com as modalidades de fertilização. Note-se que alguns dos tubérculos esverdeados também estavam abrolhados, sendo contabilizados nos dois tipos de defeitos. Em 1997 e 1998, o fenómeno praticamente não foi observado, devido ao reforço da amontoa referido em 3.1.5.5.

4.2.3.2 – Pragas

As perdas provocadas por pragas foram avaliadas nos ensaios de 1997 e 1998. Foram encontrados tubérculos total ou parcialmente destruídos devido à acção de ratazanas. Quando era possível avaliar as dimensões dos tubérculos afectados, estimava-se a perda de peso e acrescentava-se na produção do calibre correspondente. O reduzido significado dos ataques (anexo 7.9) dispensa qualquer outro comentário.

4.2.3.3 – Sarna vulgar

As feridas nos tubérculos provocadas pela sarna vulgar (*Streptomyces scabies*) foram o principal defeito externo registado nos ensaios. Na figura 15 apresenta-se a importância da doença através da incidência observada nos tubérculos. A interpretação da figura deve ser feita atendendo aos graus de incidência definidos em 3.1.6.4.

O fenómeno ocorreu em manchas de terreno, não se tendo conseguido encontrar qualquer relação com as modalidades de fertilização. A proporção de unidades experimentais em que a produção terá sido desvalorizada comercialmente por este critério foi de 66, 44 e 36 % em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

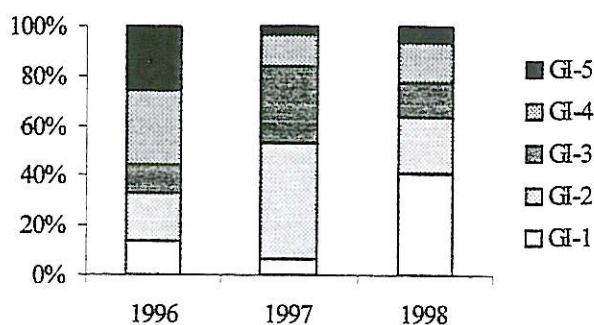


Figura 15 – Percentagem de tubérculos afetados com sarna por graus de incidência (GI).

Segundo Hooker (1986), os principais factores que condicionam o grau de incidência da doença são a reacção do solo, a sensibilidade varietal, condições hídricas deficientes durante o crescimento dos tubérculos, utilização de tubérculos/semente contaminados e período de recorrência não respeitado. Em nossa opinião, a reacção do solo [pH(H₂O) de 6,5] e alguma sensibilidade varietal terão sido os factores decisivos na incidência da doença.

4.2.3 – Relação entre gravidade específica e matéria seca

A relação entre a gravidade específica e a percentagem de matéria seca dos tubérculos é estudada de forma isolada, para cada ano de ensaio, e em conjunto agrupando os resultados dos três anos (figura 16).

Os resultados revelaram a existência de uma relação linear, altamente significativa, entre os dois componentes, tal como tem sido sugerido por outros investigadores. Contudo, a qualidade do ajustamento, traduzida pelo coeficiente de determinação, foi muito baixa. Como consequência, as constantes a e b diferiram de ano para ano. Os dados agrupados apresentaram melhor r^2 e as constantes a e b adquiriram valores mais próximos daqueles apresentados por outros investigadores (Kleinkopf *et al.*, 1987; Almeida, 1995).

Os tubérculos estavam fortemente contaminados pela sarna vulgar (figura 15). As cavidades devidas ao parasita permitiam a formação de pequenas bolhas de ar e dificultavam a remoção da totalidade da terra das feridas pela lavagem, alterando a relação massa/volume do tubérculo. Nestas condições, a variabilidade na determinação da gravidade específica não permite estimar adequadamente a matéria seca.

A gravidade específica também pode ser determinada por espectrofotometria de infravermelho próximo (Dull *et al.*, 1989). Esta técnica pode ser uma alternativa à utilização do densímetro, sobretudo se os tubérculos apresentam irregularidades externas.

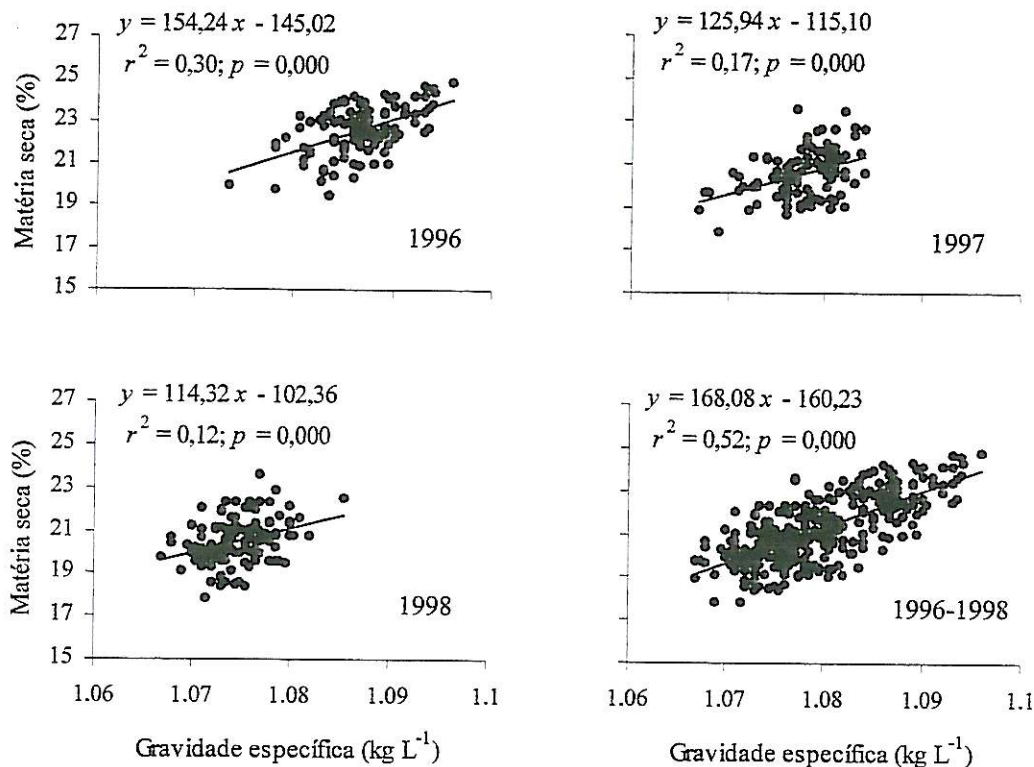


Figura 16 – Relação entre a gravidade específica e a percentagem de matéria seca dos tubérculos.

Porter e Sisson (1991 b) consideram que os tubérculos são adequados para a indústria se apresentarem valores de gravidade específica superiores a 1,08. Assim, apenas os tubérculos da colheita de 1996 apresentaram globalmente características adequadas à transformação industrial (figura 16), sendo esta uma importante limitação da cultivar experimentada.

4.3 – Eficiência de utilização do azoto

4.3.1 – Teor de azoto total nos tubérculos

Na figura 17 é apresentada a variação no teor de azoto nos tubérculos, de acordo com as modalidades de fertilização de fundo e de cobertura. Os dados dizem respeito aos valores médios dos três anos de ensaio. Na anexo 7.9 constam os resultados da análise de variância individualmente para cada um dos anos de ensaio.

O teor de azoto total nos tubérculos diferiu significativamente entre modalidades de fundo, sendo os valores mais elevados registados nas modalidades correspondentes às maiores aplicações de azoto na forma de ureia. O estrume de aviário originou resultados médios superiores aos restantes fertilizantes orgânicos. Relativamente às modalidades de ureia, os resultados do estrume de aviário posicionaram-se ao nível da modalidade N_f50. O estrume de bovino e o RSU produziram resultados idênticos entre si e comparáveis à modalidade testemunha.

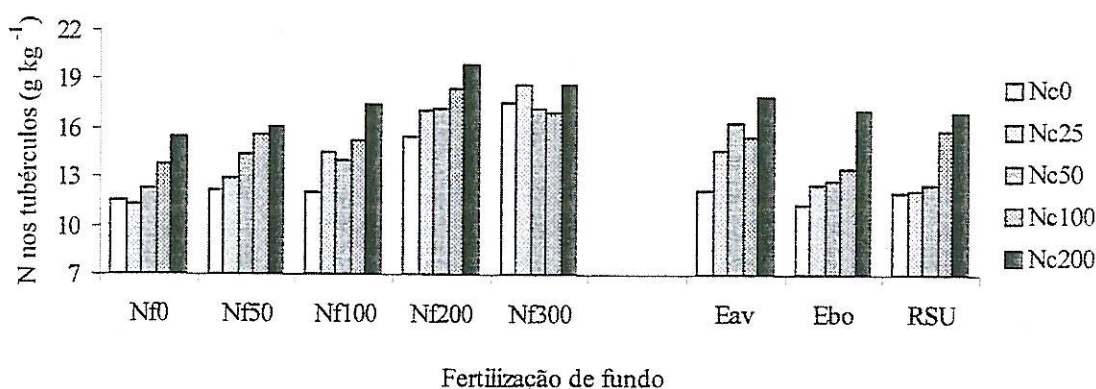


Figura 17 – Variação no teor de azoto nos tubérculos em função das modalidades de fertilização de fundo e do azoto aplicado em cobertura. Valores médios dos três anos de ensaio.

As modalidades de cobertura originaram resultados significativamente diferentes, independentemente das modalidades de fundo. A interacção não foi significativa. Este resultado demonstra que o teor de azoto nos tubérculos continua a aumentar de forma significativa até doses de azoto muito superiores à dose técnica óptima.

Está devidamente documentado que o teor de azoto nos tubérculos pode variar significativamente para a mesma produção, dependendo do azoto disponível no solo (Lauer, 1985; Westermann e Davis, 1992; Rodrigues, 1995). Este resultado demonstra que os tubérculos também podem acumular azoto acima do necessário para a obtenção da produção máxima (consumo de luxo), tal como acontece com os órgãos aéreos.

O teor em azoto nos tubérculos variou entre 9,7 e 18,7 g kg⁻¹, dependendo das modalidades de fertilização. A variação entre anos de ensaio foi reduzida (anexo 7.9). Joern e Vitosh (1995 b) publicaram valores da mesma ordem de grandeza para a cv. R. Burbank, variando entre 10 e 18 g kg⁻¹, mas com grande variação entre locais de ensaio. Coelho (1992) registou valores sem variação significativa com o azoto na cv. Spunta. O teor de azoto nos tubérculos oscilou entre 16,3 e 19,7 g kg⁻¹ para as modalidades de fertilização constituídas por

0 e 400 kg N ha⁻¹, respectivamente. Rodrigues (1995) encontrou valores compreendidos entre 12,9 e 21,0 g kg⁻¹ na cv. Stemster, dependendo da modalidade de fertilização azotada.

4.3.2 – Azoto exportado pelos tubérculos

O azoto exportado resulta do produto da matéria seca total dos tubérculos pelo seu teor em azoto. Os valores médios dos três anos de ensaio são apresentados na figura 18. Os resultados das análises de variância efectuadas para cada ano individualmente encontram-se no anexo 7.15.3.

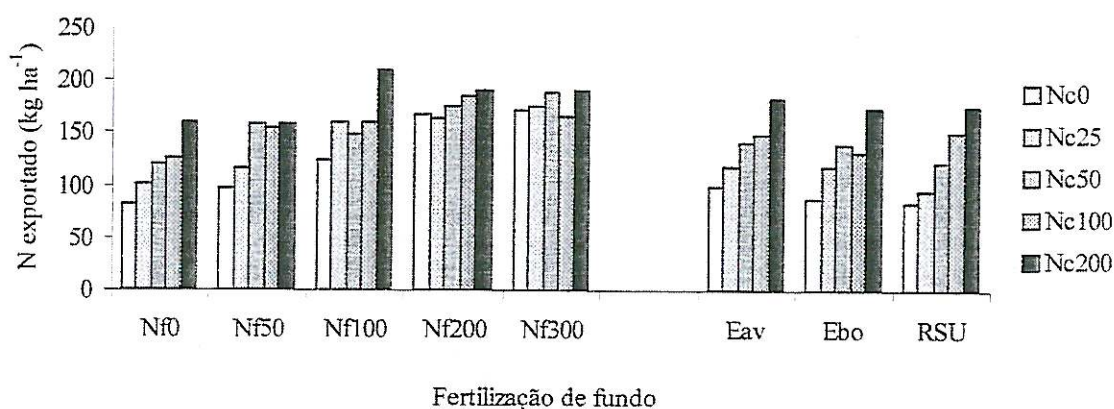


Figura 18 – Variação no azoto exportado pelos tubérculos das modalidades de fertilização de fundo e do azoto aplicado em cobertura. Valores médios dos três anos de ensaio.

O azoto exportado pelos tubérculos diferiu significativamente entre modalidades de fertilização de fundo. As batateiras fertilizadas com pouco azoto na forma de ureia e as modalidades com correctivos orgânicos exportaram quantidades de azoto muito baixas relativamente às modalidades com doses de ureia elevadas. Em valor médio, o azoto exportado aumentou de 82 para 172 kg ha⁻¹ entre as modalidades de fundo Nf0 e Nf300. O resultado reflectiu o efeito conjugado do aumento significativo do azoto nos tubérculos e da produção. Coelho (1992) obteve valores de azoto exportado variando entre 72,1 e 108,9 kg N ha⁻¹ na cv. Spunta. A menor exportação de azoto registada por Coelho (1992) pode ser atribuída a diferenças na produção. A autora obteve produtividade abaixo de 24 Mg ha⁻¹, muito inferiores às 50 Mg ha⁻¹ obtidas nos ensaios agora em análise.

O efeito das coberturas diferiu ligeiramente entre anos. Em 1997, a interacção entre modalidades de fundo e de cobertura não foi significativa. Em 1996, a probabilidade

associada à interacção foi de 90 % ($p = 0,100$) e em 1998 a interacção foi significativa ($p = 0,033$). O facto de nem sempre haver interacção significativa entre modalidades de fundo e de cobertura resulta da produção, um dos parâmetros de que depende o azoto exportado, não aumentar continuamente com a dose de azoto. Apenas o teor em azoto nos tubérculos, o outro factor de que depende o azoto exportado, apresenta este comportamento (figura 17). Assim, nas modalidades de fundo que disponibilizam pouco azoto (p. ex. testemunha e correctivos orgânicos), o nutriente exportado aumenta significativamente com as coberturas, devido ao efeito conjugado do aumento de produção e do teor de azoto nos tubérculos. Nas modalidades de fundo que disponibilizam muito nutriente (p. ex. N_f200 e N_f300), o aumento do azoto exportado é menos evidente, já que resulta apenas do aumento do teor de azoto nos tubérculos.

4.3.3 – Percentagem do azoto dos fertilizantes recuperado pelos tubérculos

A percentagem de azoto dos fertilizantes recuperado pelas plantas é o indicador mais utilizado para avaliar a eficiência de uso do nutriente. Obtém-se pela diferença entre o azoto recuperado nas modalidades fertilizadas e na testemunha dividindo pela quantidade de nutriente utilizado nas modalidades fertilizadas (2.1.5). Os resultados para as modalidades de fundo, cobertura e azoto total aplicado são apresentados na figura 19, quadro 10 e figura 20, respectivamente. Utilizaram-se os valores médios dos três anos de ensaio de cada uma das modalidades de fertilização.

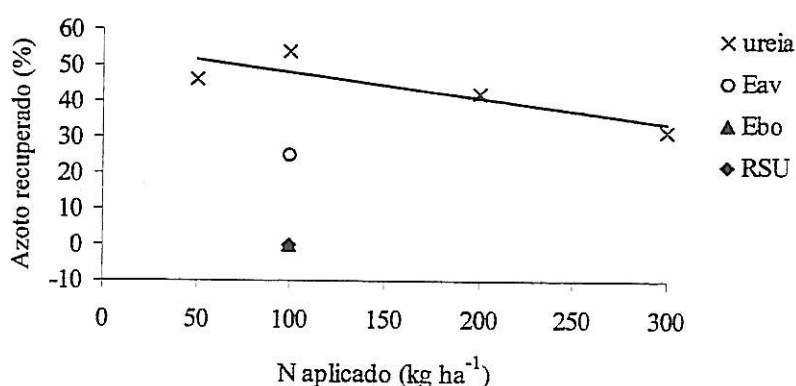


Figura 19 – Percentagem de azoto recuperado nas modalidades de fertilização de fundo.

A percentagem de azoto recuperado nas modalidades de fertilização de fundo decresceu com o aumento da dose de ureia utilizada (figura 19). Este é o tipo de resultado esperado

nesta cultura (Kleinkopf *et al.*, 1981; Tyler *et al.*, 1983; Rodrigues 1995) e em muitas outras, como o milho (Walters e Malzer, 1990 a; Reddy e Reddy, 1993), o girassol (Costa e Giovanardi, 1994), a beterraba sacarina (Mambelli e Grandi, 1994) e a cevada (Reluy *et al.*, 1994).

A percentagem de azoto dos correctivos orgânicos recuperada foi muito baixa. No estrume de aviário, a eficiência teve um valor médio de 25 %. Nas modalidades fertilizadas com estrume de bovino e RSU os tubérculos não recuperaram, em média, mais azoto que na testemunha, pelo que a eficiência foi praticamente nula. Este resultado está de acordo com as indicações obtidas na produção sobre o comportamento destes fertilizantes, relativamente à reduzida quantidade de azoto que terão disponibilizado para as plantas.

Quadro 10 – Percentagem de azoto recuperado nas modalidades de cobertura em função das modalidades de fundo. Valores médios dos três anos de ensaio.

Modalidades de fundo	Modalidades de cobertura			
	N _c 25	N _c 50	N _c 100	N _c 200
N _f 0	69,2	58,5	46,8	37,3
N _f 50	39,5	62,9	51,9	33,3
N _f 100	86,9	15,3	30,2	34,5
N _f 200	-5,4	9,8	23,3	11,4
N _f 300	-42,2	6,7	8,2	10,0
Eav	34,7	44,5	34,6	32,9
Ebo	79,0	74,0	51,6	41,6
RSU	42,4	54,8	60,2	41,9

A percentagem de azoto recuperado nas modalidades de cobertura dependeu da fertilização de fundo (quadro 10). Para modalidades de fundo que disponibilizam pouco azoto, a percentagem recuperada de nutriente aplicado em cobertura decresceu com o aumento da dose aplicada. Para modalidades de fundo que disponibilizam muito azoto, a percentagem recuperada foi muito baixa, independentemente da dose utilizada.

As aplicações de azoto em cobertura conduzem, por vezes, a uma maior eficiência de utilização do nutriente (Westermann *et al.*, 1988; Roberts *et al.*, 1991), sendo uma das grandes justificações do fraccionamento (2.4.4.1). Contudo, da informação disponível na figura 19 e no quadro 10, não nos parece evidente que, neste ensaio, as plantas tenham utilizado de forma mais eficiente o azoto aplicado em cobertura que em fundo. Aceitando este resultado, valida-se a metodologia de campo, designadamente as precauções tidas com a rega.

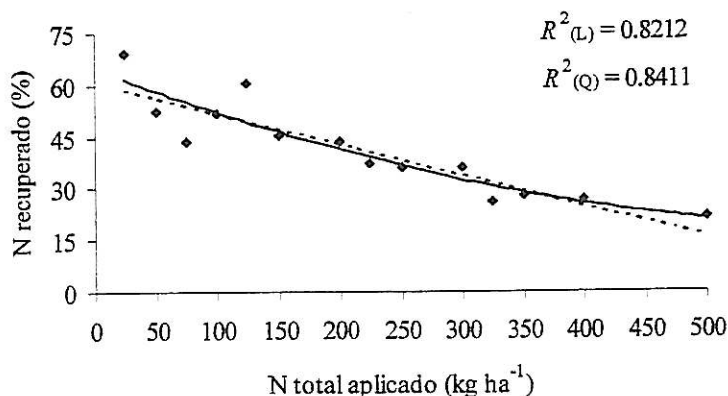


Figura 20 – Percentagem de azoto recuperado relativamente ao azoto total aplicado. Valores médios dos três anos de ensaio. Legenda: L – linear; Q – quadrática.

O decréscimo da percentagem de azoto recuperado com o aumento da dose utilizada é ainda mais evidente quando calculada em função do azoto total aplicado (figura 20). A função quadrática ajusta-se ainda melhor aos dados que o modelo linear. Este resultado traduz, de alguma maneira, o facto dos tubérculos continuarem a acumular azoto para além da concentração a que corresponde a produção máxima, fenómeno já designado de consumo de luxo.

O azoto recuperado, para aplicações compreendidas entre 200 e 300 kg N ha⁻¹ (gama na qual foi encontrada a dose técnica óptima), situou-se entre 40 a 50 %. Estes valores devem ser considerados muito baixos, atendendo à elevada quantidade de nutriente que se perde. Contudo, não são valores inferiores aos registados por outros investigadores (Tyler *et al.*, 1983; Joern e Vitosh, 1995 b; Rodrigues, 1995). Parte da responsabilidade poderá ser atribuída à própria cultura, normalmente considerada daquelas que utiliza o azoto com menor eficiência (Boswell *et al.*, 1985). A debilidade do sistema radicular e a remobilização incompleta do azoto da parte aérea para os tubérculos podem ser avançadas como causas prováveis para explicar o fenómeno.

4.4 – Indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de azoto no solo

4.4.1 – Estados fenológicos e cronologia do desenvolvimento das plantas

O estudo da evolução de parâmetros da fenologia das plantas apresenta particular importância em trabalhos de avaliação do estado nutritivo das culturas, na medida em que os

indicadores que se utilizam variam ao longo da estação de crescimento. Desta forma, torna-se necessário padronizar, com rigor, datas de amostragem a que correspondam estados fenológicos bem definidos. Em alternativa utilizam-se escalas cronológicas, tipo dias após plantação (DAP), ou escalas mistas (cronológicas/fisiológicas), como dias após emergência (DAE). Este assunto foi discutido em 2.3.4.1.

4.4.1.1 – Data de emergência

Como já foi referido, definiu-se como emergência a data em que a população nascida era igual a 50 % da população potencial (Portas e Martins, 1981). Na figura 21 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de 1998. Nesse ano, a emergência ocorreu em 15 DAP. Em 1996 e 1997 determinou-se, pelo mesmo critério, como datas de emergência 14 e 13 DAP, respectivamente.

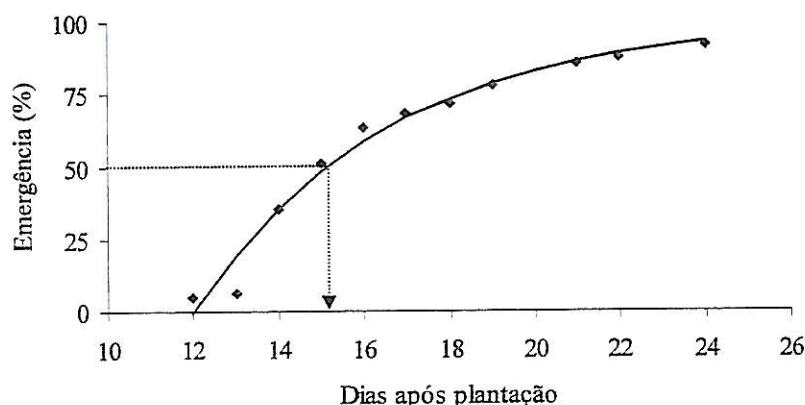


Figura 21 – Evolução da emergência das jovens plantas.

Os resultados sugerem que, nestas condições, seria indiferente a utilização de DAP ou DAE, dada a reduzida variabilidade na duração da emergência entre anos de ensaio. Contudo, deve referir-se que, nos três anos de ensaio, os tubérculos foram sujeitos a pré-abrolhamento por um período de tempo idêntico, sendo a sua idade fisiológica similar na data de plantação. No campo, as condições ambientais durante a emergência foram também muito idênticas.

Em ensaios de campo, quando se combinou, de forma factorial, a utilização de propágulos inteiros de vários calibres, cortados em várias partes e com ou sem período de pré-abrolhamento, foi obtida uma variação no período de emergência de 5 dias (dados não publicados). Este resultado concorre para que a escala cronológica DAP seja preterida em

favor da escala cronológica/fisiológica DAE, pela maior versatilidade da segunda na adaptação a situações culturais diversas.

4.4.1.2 – Desenvolvimento fenológico das plantas

A fenologia das plantas foi avaliada segundo a taxa de cobertura do solo, a altura das plantas, a vegetação e a floração. Procuraram-se estados fenológicos que permitam padronizar datas de amostragem. Os resultados correspondentes ao ensaio de 1997 são utilizados para exemplificar a evolução dos três primeiros parâmetros ao longo do ciclo (figura 22). No quadro 11 apresenta-se a evolução da floração. Nos anexos 7.15.4 e 7.15.5 estão os resultados da análise de variância da taxa de cobertura e da altura das plantas para os ensaios de 1997 e 1998.

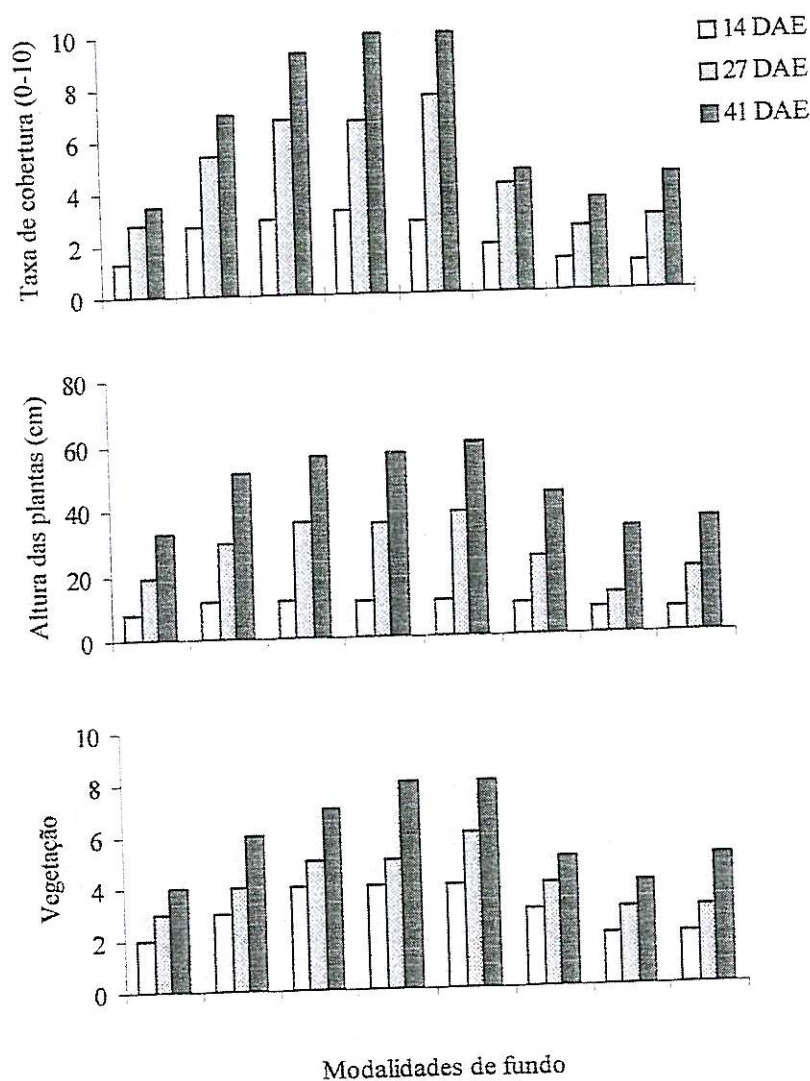


Figura 22 – Taxa de cobertura, altura das plantas e vegetação. Dados de 1997.

Pela figura 22 e pelos resultados da análise de variância verifica-se que os parâmetros taxa de cobertura, altura das plantas e vegetação diferiram significativamente entre modalidades de fertilização em todas as datas de amostragem. O facto destes parâmetros serem sensíveis a diferentes situações culturais, designadamente à fertilização azotada, retira-lhe qualquer utilidade na definição de estados fenológicos utilizáveis na avaliação do estado nutritivo azotado das plantas. Por exemplo, a plantas com taxas de cobertura idênticas podem corresponder fases do ciclo ou idades fisiológicas completamente diferentes.

A floração não foi sensível à fertilização azotada (quadro 11). Independentemente do desenvolvimento vegetativo, os estados fenológicos associados à floração decorreram, simultaneamente, em todas as modalidades de fertilização. A reduzida sensibilidade da floração às condições culturais confere-lhe vantagens relativamente aos parâmetros vegetativos anteriormente analisados. Contudo, a floração começa demasiado tarde no ciclo e as suas fases são muito demoradas, não permitindo padronizar, com rigor, datas de amostragem.

No quadro 12 faz-se a correspondência possível entre os critérios de natureza fisiológica e cronológica utilizáveis na definição de datas de amostragem para avaliar o estado nutritivo das plantas.

Quadro 11 – Evolução da floração (interpretação no anexo 7.8)

Modalidades de fundo	Dias após emergência								
	10***	14**	16***	20*	27**	34***	35*	41**	48*
N _f 0	0	0	0	---	1	3	---	3	---
N _f 100	0	0	0	1	1	3	3	3	4
N _f 300	0	0	0	---	1	3	---	3	---

* dados de 1996; ** 1997; e *** 1998

Neste trabalho elegeram-se o critério dias após emergência para apresentar os resultados. É, quanto a nós, o mais adequado para usar em regiões de características ecológicas e culturais homogêneas, onde não seja de esperar grande variabilidade no ritmo de desenvolvimento das plantas. A maior dificuldade será garantir que a data de emergência seja avaliada por um critério quantitativo por parte dos agricultores.

Quadro 12 – Correspondência entre escalas cronológicas e fenológicas para as datas de avaliação do estado nutritivo das plantas.

Ano	Data	DAP	DAE	Taxa cobertura	Altura plantas (cm)	Vegetação*	Floração*
1996**	1 Jul.	34	20	6	---	---	1
	16 Jul.	49	35	10	---	---	3
	29 Jul.	62	48	10	---	---	4
1997	24 Jun.	27	14	1 a 3	7 a 12	3 a 4	0
	7 Jul.	40	27	3 a 8	12 a 38	3 a 6	1
	21 Jul.	54	41	4 a 10	32 a 60	4 a 8	3
1998	15 Jun.	25	10	2 a 3	10 a 13	2 a 3	0
	21 Jun.	31	16	3 a 5	18 a 25	3 a 5	0
	9 Jul.	49	34	6 a 10	51 a 64	6 a 8	3

* interpretação no anexo 7.8.

**valores médios de taxa de cobertura e floração tendo por base a modalidade N_f100.

4.4.2 – Efeito do azoto nos indicadores do estado nutritivo

4.4.2.1 – Nitratos nos pecíolos

Na figura 23 apresenta-se a relação entre o azoto aplicado como fertilizante e a concentração de nitratos nos pecíolos (determinação laboratorial), em três datas de amostragem de cada um dos três anos de ensaio. Os resultados dos correctivos orgânicos foram colocados nas figuras para efeitos comparativos.

Entre modalidades de fertilização ocorreram diferenças altamente significativas no teor de nitratos nos pecíolos (anexo 7.15.6). O resultado reflecte a elevada capacidade das plantas em absorver e armazenar nitratos, desde que disponíveis.

A concentração de N-NO₃⁻ nos pecíolos atingiu valores de 36,3, 33,7 e 35,0 g kg⁻¹ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Westcott *et al.* (1991) registaram valores máximos ligeiramente mais baixos, entre 25 a 30 g kg⁻¹, na cv. Russet Burbank.

Nas primeiras datas de amostragem, a relação entre o azoto aplicado e a concentração de N-NO₃⁻ nos pecíolos foi ajustada por equações quadráticas. Apesar da elevada quantidade de azoto que as plantas podem acumular nesta forma de reserva, o resultado reflecte a saturação da capacidade de absorção de azoto por parte das plantas. Porter e Sisson (1991 a) e Westcott *et al.* (1991) utilizaram também o modelo quadrático para descrever aquela relação, enquanto

Westcott *et al.* (1994) sugerem a curva de saturação de Michaelis-Menten, com a forma $y = ax/(b + x)$.

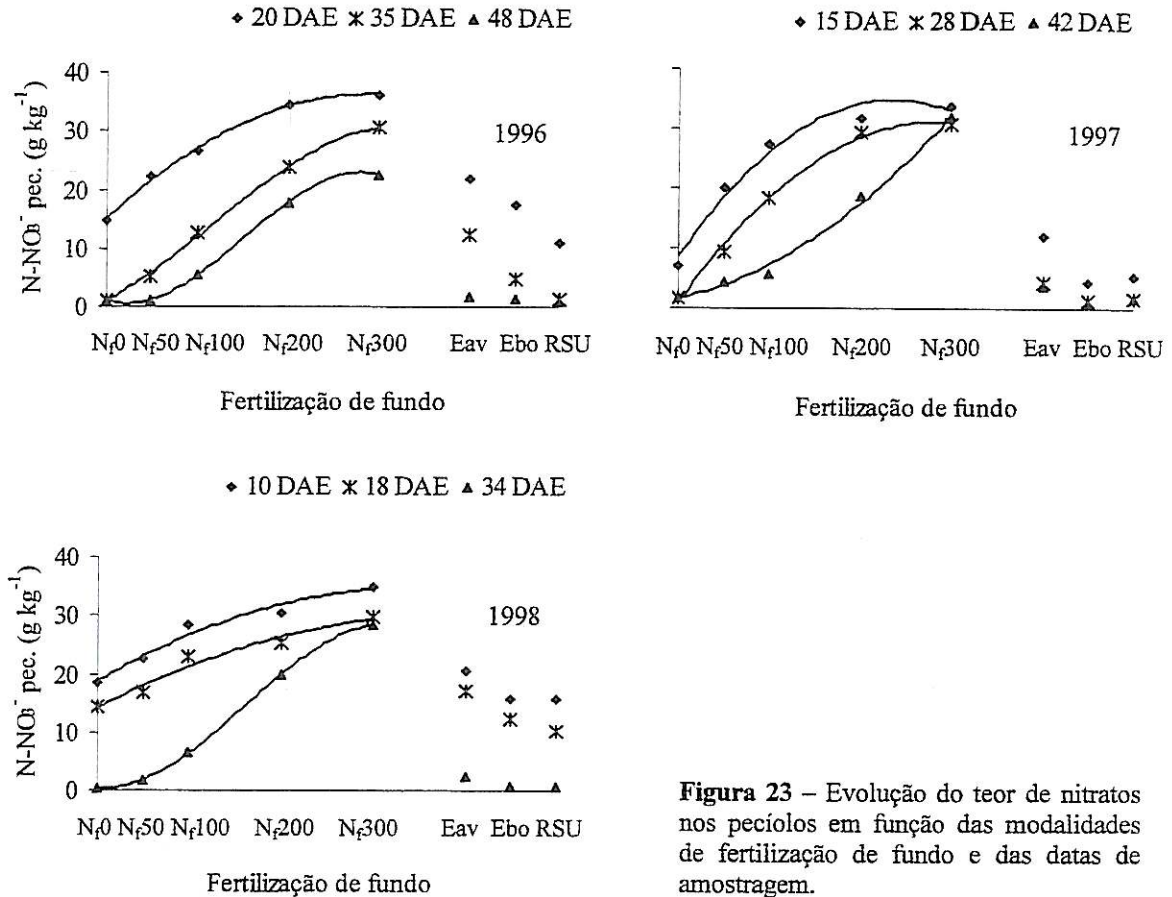


Figura 23 – Evolução do teor de nitratos nos pecíolos em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem.

Ao longo da estação de crescimento, a relação entre o azoto aplicado e o teor de nitratos nos pecíolos evoluiu para um polinómio de terceiro grau. Esta relação traduziu a exaustão do azoto mineral disponível no solo nas modalidades menos fertilizadas, enquanto nas modalidades mais fertilizadas, o azoto disponível no solo garantia ainda níveis de nitratos nos pecíolos elevados. Porter e Sisson (1991 a) ajustaram, igualmente, um polinómio de terceiro grau aos seus resultados nas fases mais avançadas do ciclo.

O teor de nitratos nos pecíolos decresceu ao longo da estação de crescimento (comparação entre datas de amostragem). Diversos investigadores apresentaram resultados idênticos (Roberts e Cheng, 1988; Nitsch e Varis, 1991; Porter e Sisson, 1991 a; Westcott *et al.*, 1991). Quando existe azoto disponível no solo, as plantas absorvem-no em quantidades superiores às suas necessidades, acumulando-se na forma de nitratos nos tecidos condutores. Ao longo da estação de crescimento, o azoto armazenado é redistribuído pelas partes em

crescimento, designadamente ramificações aéreas e tubérculos. Por outro lado, o azoto disponível no solo também diminui. Estes dois efeitos conjugados conduzem à redução, que pode ser rápida, do teor de nitratos nos pecíolos. Tomando como referência a modalidade testemunha do ensaio de 1996, verificou-se que em 15 dias (entre 20 e 35 DAE) o teor de nitratos nos pecíolos decresceu de 14,7 para 1,1 g N-NO₃⁻ kg⁻¹. Outros exemplos poderiam ser tomados da figura 23 e usados para evidenciar decréscimos da mesma ordem de grandeza.

Entre correctivos orgânicos, o estrume de aviário apresentou os resultados mais elevados. No geral, os resultados do estrume de aviário foram estatisticamente superiores ao estrume de bovino e RSU na primeira e segunda datas de amostragem (anexo 7.15.6). Na terceira data, as diferenças deixaram de ser significativas, pela redução acentuada dos nitratos nos pecíolos em todas as modalidades que disponibilizaram pouco azoto. A diferença de comportamento entre o estrume de aviário e os restantes correctivos orgânicos justifica-se pela sua composição química, designadamente pelo maior teor em azoto e menor razão C/N.

O estrume de aviário apresentou resultados estatisticamente superiores à modalidade testemunha em 1996 na primeira e segunda datas de amostragem e em 1997 na primeira data de amostragem. Em todas as datas de 1998 e nas restantes datas de 1996 e 1997, os resultados destas duas modalidades não diferiram estatisticamente. Relativamente à modalidade N_f50, os resultados não apresentam diferenças estatísticas salvo duas excepções. Na segunda data de amostragem de 1996, o resultado do estrume de aviário foi superior ao da modalidade N_f50, acontecendo o inverso na primeira data de 1997. Os resultados do estrume de bovino e RSU foram sempre estatisticamente iguais entre si e às modalidades testemunha.

Os correctivos orgânicos evidenciaram uma aparente baixa disponibilidade de azoto para as plantas. Os resultados da produção e da eficiência de uso do azoto tinham já dado a mesma indicação. Outros investigadores detectaram limitações semelhantes no contributo de materiais orgânicos para a nutrição azotada das plantas (Pomares-Garcia e Pratt, 1978 a,b; Rodrigues, 1995; Carneiro e Santos, 1996). Pomares-Garcia e Pratt (1978 a) verificaram que estrumes com 1,5 % de azoto apenas disponibilizaram 4,2 % do seu azoto total em 2,5 meses. Ao fim de 10 meses, o azoto disponibilizado foi de apenas 17 %.

O efeito dos correctivos orgânicos na nutrição azotada das plantas pode não ficar devidamente esclarecido pela análise deste indicador. Em primeiro lugar, porque se espera que as substâncias orgânicas libertem o azoto gradualmente ao longo do ciclo, mesmo que nas primeiras fases o balanço do processo mineralização/imobilização não seja favorável às plantas. Desta forma, não seria detectado qualquer efeito positivo dos estrumes na nutrição azotada das plantas na primeira data de amostragem. Mais tarde, nem que os estrumes tenham

libertado algum azoto, a disponibilidade de nutriente no solo é tão baixa que o azoto absorvido será assimilado e canalizado para estruturas prioritárias, em desfavor dos órgãos de reserva, não sendo possível detectar diferenças com significado estatístico.

Em 1997, a concentração de nitratos nos pecíolos na modalidade testemunha e nas outras modalidades que disponibilizaram pouco azoto, designadamente dos correctivos orgânicos, foi particularmente baixa (figura 23). Este resultado evidencia menor disponibilidade natural de azoto no solo e justifica a quebra de produção detectada nesse ano (4.1.2) para as modalidades de fertilização referidas

4.4.2.2 – Azoto total nas folhas

A relação entre o azoto aplicado como fertilizante e o teor de azoto nas folhas traduziu-se em equações quadráticas nas primeiras datas de amostragem, evoluindo para polinómios de terceiro grau nas fases mais avançadas do ciclo (figura 24), tal como ocorreu para o teor de nitratos nos pecíolos.

As diferenças no azoto total nas folhas entre modalidades de fertilização foram estatisticamente significativas (anexo 7.15.7). O acréscimo do azoto nas folhas devido à maior disponibilidade de azoto no solo foi também verificado por Gupta e Saxena (1976 b), MacLean (1984), Coelho (1992) e Rodrigues (1995). A saturação ocorreu para teores de azoto nas folhas de 54,0, 56,2, 57,7 g kg⁻¹ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

Ao longo da estação de crescimento, o teor de azoto nas folhas decresceu, sobretudo nas modalidades menos fertilizadas. Contudo, o decréscimo não foi tão acentuado como no teor de nitratos. Os valores registados na última data de amostragem de cada ano foram de 30,8, 36,4 e 39,5 g kg⁻¹ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Este resultado demonstra que, nas folhas, existe uma fracção que se comporta como reserva, que vai sendo utilizada à medida que a disponibilidade de azoto no solo diminui, e uma parte estrutural, indispensável à manutenção da funcionalidade da folha.

O estrume de aviário deu origem a teores médios de azoto nas folhas superiores aos restantes fertilizantes orgânicos. Contudo, as diferenças foram significativas apenas em 1996 na primeira e segunda datas de amostragem e em 1997 na primeira data de amostragem (anexo 7.15.7). Relativamente às modalidades com ureia, o estrume de aviário deu origem a valores médios superiores à modalidade testemunha, embora só na segunda data de amostragem de 1996, as diferenças fossem significativas. Comparativamente à modalidade

N_f50, os resultados estiveram sempre muito próximos em valor médio, nunca tendo sido observadas diferenças significativas.

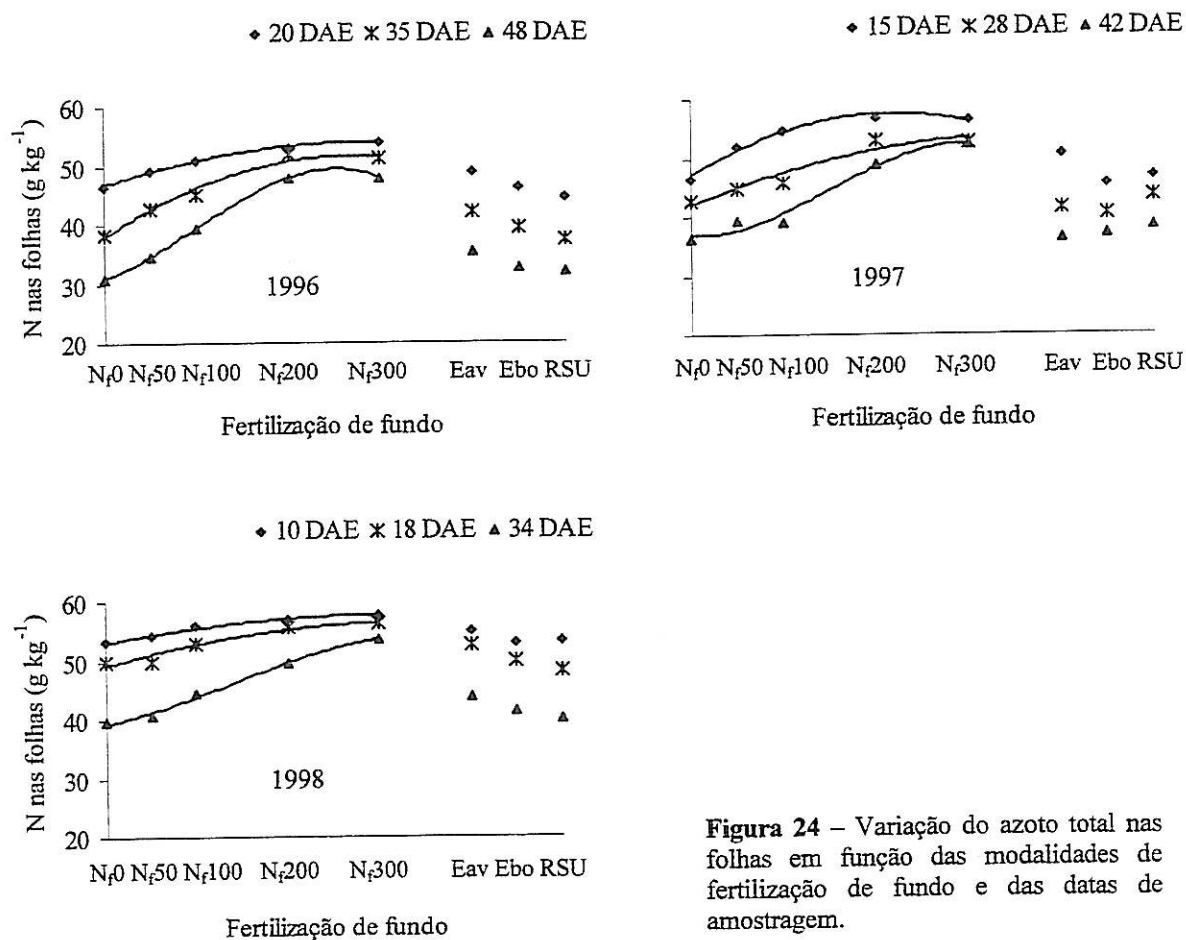


Figura 24 – Variação do azoto total nas folhas em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem.

Os resultados do estrume de bovino e do RSU foram sempre muito idênticos entre si e à modalidade testemunha. Nunca foram registadas diferenças significativas entre as três modalidades de fertilização. Tal como tinha sido observado com o teor de nitratos, não foi possível registar melhorias significativas no estado nutritivo das plantas fertilizadas com os correctivos orgânicos nas fases finais do ciclo. Contudo, os valores médios da última data de amostragem foram ligeiramente superiores à modalidade testemunha. Nesta perspectiva, talvez o balanço líquido do processo mineralização/imobilização tenha sido favorável às plantas nas fases mais avançadas do ciclo e a insuficiente sensibilidade do indicador não tenha permitido que as pequenas diferenças tivessem significado estatístico. Contudo, os resultados da eficiência de uso do azoto (4.3.3) não suportam esta teoria.

4.4.2.3 – Estimativas do teor de clorofila

A evolução dos valores de clorofila SPAD seguiu, de perto, a tendência geral observada para os nitratos nos pecíolos e para o azoto total nas folhas. Nas primeiras datas, os dados ajustaram-se a uma equação quadrática, evoluindo, mais tarde, para um polinómio de terceiro grau (figura 25). O ajustamento quadrático foi registado por Minotti *et al.* (1994) na cultura da batata, por Waskom *et al.* (1996) em milho e por Kantety *et al.* (1996) na festuca alta. Tendo por base os resultados de 1998, o valor de saturação foi equivalente a 61,0 unidades SPAD.

Na primeira data de amostragem, os valores de clorofila SPAD são idênticos entre todas as modalidades de fertilização com ureia. As diferenças entre a modalidade mais fertilizada (N_f300) e a modalidade testemunha não foram significativas. Também Vos e Bom (1993) não registaram diferenças no teor de clorofila SPAD em 14 DAE na cultura da batata. Este resultado traduz o facto da molécula de clorofila ser uma estrutura prioritária para o azoto disponível e de não estar sujeita a situações de luxo (2.3.7.1.2).

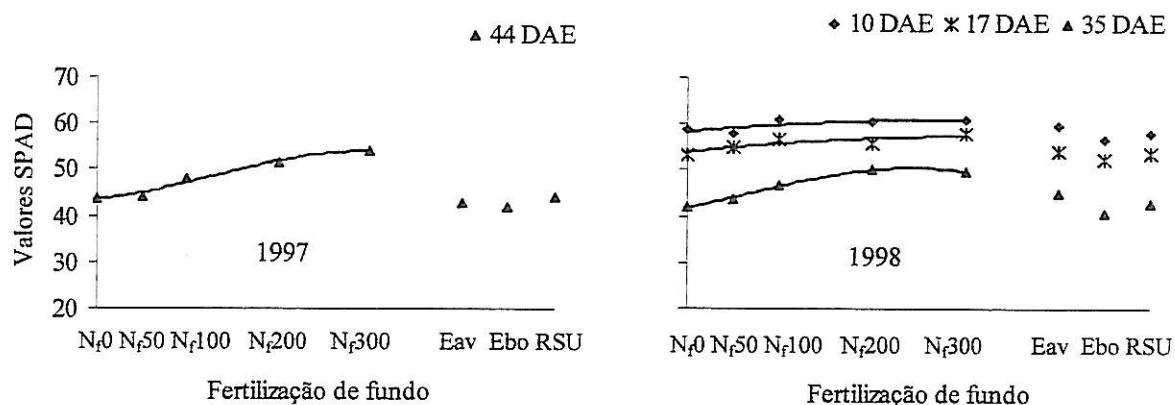


Figura 25 – Evolução dos valores SPAD em função das modalidades de fertilização de fundo e das datas de amostragem.

Ao longo da estação de crescimento, os valores SPAD decresceram de forma mais acentuada nas modalidades menos fertilizadas. Resultado idêntico foi registado por Minotti *et al.* (1994) na cultura da batata e por Kantety *et al.* (1996) na festuca alta. A menor disponibilidade de azoto no solo, o aumento da dimensão da canóvia e a forte competição dos tubérculos pelo azoto disponível concorrem, em conjunto, para justificar o resultado. Apesar das clorofilas serem apresentadas como estruturas prioritárias para o azoto, os seus níveis na planta também dependem do azoto disponível no solo (Gregory *et al.*, 1981; Firman e Allen,

1988). A clorose é, em muitas situações, o sintoma visual que caracteriza uma carência extrema de azoto.

O posicionamento dos correctivos orgânicos entre si e com as modalidades de fertilização com ureia é idêntico ao verificado com os indicadores anteriores. Contudo, as diferenças nunca são estatisticamente significativas. O facto das clorofilas serem estruturas prioritárias para o azoto e do seu teor não aumentar com doses de excessivas do nutriente origina uma redução na amplitude de resposta aos fertilizantes azotados. Desta forma, não é possível, com base neste indicador, melhorar o conhecimento sobre o comportamento dos correctivos orgânicos nas fases avançadas do ciclo.

4.4.2.4 – Azoto inorgânico no solo durante a estação de crescimento

Na figura 26 apresenta-se a relação entre o azoto aplicado como fertilizante em fundo e o azoto inorgânico no solo durante a estação de crescimento. Estuda-se, em separado, a relação com o teor de nitratos no solo, seguindo de perto a metodologia base de Magdoff *et al.* (1984), e com a totalidade do azoto mineral (NH_4^+ + NO_3^-).

Na primeira data de amostragem foi estabelecida uma relação linear entre o azoto aplicado na forma de ureia e o azoto mineral no solo (NO_3^- e $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$). Na segunda e terceira datas, o melhor ajustamento conseguiu-se com a equação quadrática. O resultado traduz a exaustão progressiva do azoto mineral no solo devido à absorção pelas plantas.

A análise de variância (anexo 7.15.10) identifica diferenças estatísticas entre modalidades de fertilização, reflectindo o efeito dos tratamentos na disponibilidade biológica de azoto no solo. À medida que se avança na estação de crescimento, as diferenças atenuam-se e caminham-se, em todas as modalidades, para valores mínimos de azoto no solo estáveis, tal como verificaram Greenwood *et al.* (1985 a). Na terceira data de amostragem, a análise de variância distinguiu apenas as modalidades N_f200 e N_f300 dos restantes tratamentos. Nas modalidades N_f200 e N_f300 entre si e nos restantes tratamentos entre si, as diferenças não tiveram significado estatístico.

Os valores de azoto inorgânico no solo de 1997 são globalmente inferiores aos de 1998. Atendendo a que foram utilizados os mesmos tratamentos fertilizantes, os resultados podem justificar-se por diferente disponibilidade natural de azoto no solo. Recorde-se que, em situações anteriores (4.1.2 e 4.4.2.1), houve necessidade de se avançar com esta tese para justificar resultados.

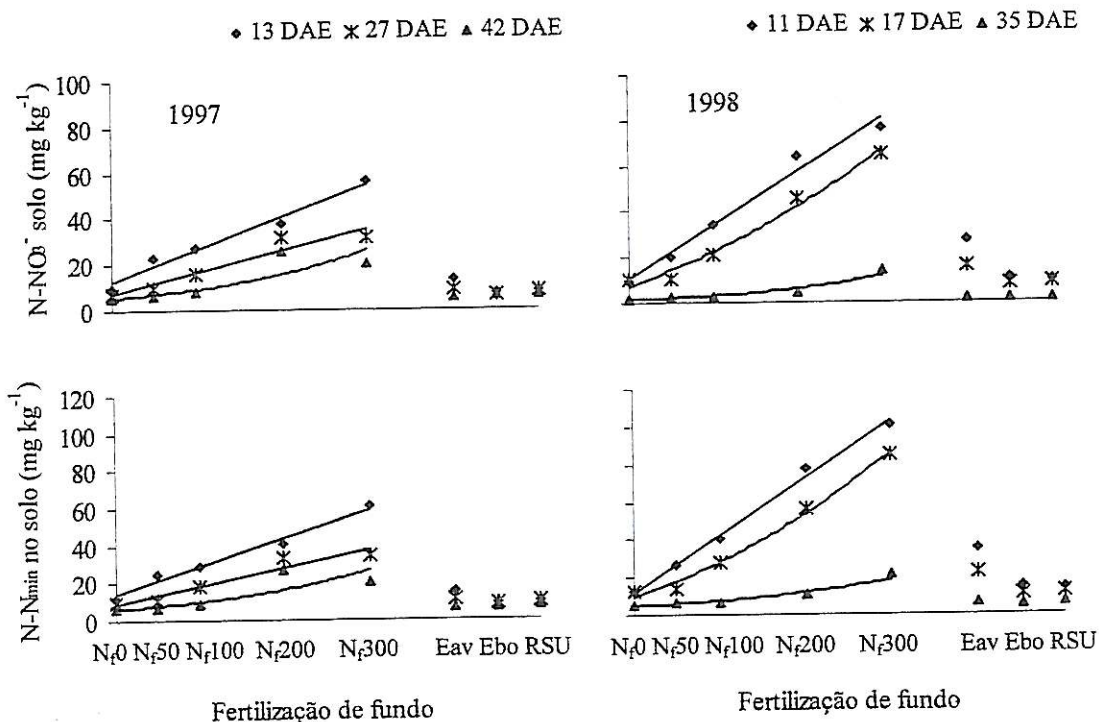


Figura 26 – Evolução dos níveis de azoto mineral no solo em função das modalidades de fertilização de fundo e datas de amostragem.

Na primeira data de amostragem de 1997, os níveis de nitratos no solo, na modalidade fertilizada com estrume de aviário, foram, em valor médio, inferiores aos da modalidade N_f50 e superiores aos das modalidades testemunha, estrume de bovino e RSU. Contudo, as diferenças não foram significativas. Na primeira data de amostragem de 1998, os resultados médios do estrume de aviário foram superiores aos da modalidade N_f50, testemunha e restantes correctivos orgânicos. As diferenças também não tiveram significância. Nas datas de amostragem seguintes, as diferenças entre tratamentos diminuíram, devido à absorção do azoto pelas plantas. O resultado demonstra que este indicador, à semelhança dos anteriores, também não é adequado para avaliar o contributo dos estrumes para a nutrição azotada das plantas nas fases mais avançadas do ciclo.

A inclusão do N-NH₄⁺, relativamente ao uso isolado de N-NO₃⁻, na determinação disponibilidade biológica de azoto no solo parece não trazer qualquer vantagem. A hidrólise da ureia e posterior nitrificação das formas amoniacais são processos rápidos nestas condições, sendo o NO₃⁻ a forma dominante do azoto mineral no solo.

4.4.3 – Relação entre indicadores

4.4.3.1 – Determinação da concentração de nitratos nos pecíolos pelo método laboratorial e pelo reflectómetro portátil

Na figura 27 apresenta-se a relação entre o teor de nitratos nos pecíolos determinado por dois métodos diferentes. Em abcissa colocaram-se os resultados obtidos pelo método expedito, utilizando o reflectómetro portátil, cuja preparação dos extractos incidiu sobre tecidos frescos. Na ordenada foram colocados os resultados do método laboratorial, que envolveu a determinação dos nitratos a partir da matéria seca. Os resultados de 1996 do RQflex[®] foram expressos em concentração na solução obtida com o suco celular, uma vez que, nesse ano, não foi determinado o teor de humidade dos pecíolos. Os resultados de 1997 e 1998 foram expressos na matéria seca, tal como os resultados do método laboratorial.

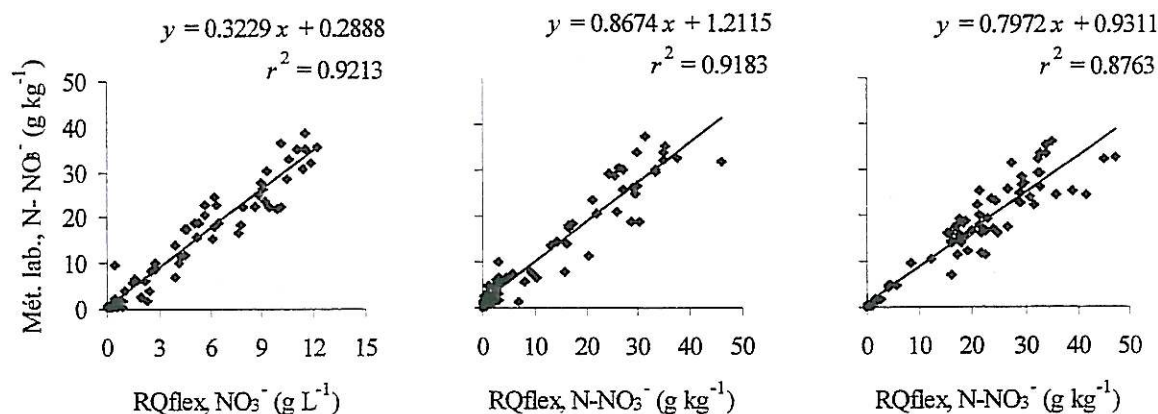


Figura 27 – Relação entre a concentração de nitratos nos pecíolos determinada pelos métodos expedito e laboratorial.

A relação entre o teor de nitratos nos pecíolos determinado pelos dois métodos estabeleceu-se segundo uma recta. Os coeficientes de determinação foram 0,92, 0,92 e 0,88 em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Os declives das rectas referentes a 1997 e 1998 foram significativamente diferentes da unidade. O resultado indica que o método expedito sobrestimou, em 15 a 20 %, o teor de nitratos nos pecíolos. As diferenças deverão ser atribuídas à forma como são preparados os extractos e não à leitura propriamente dita do teor de nitratos em solução. Este último aspecto foi estudado tendo por referência soluções de nitrato de potássio de concentrações conhecidas e comentado em 3.1.6.2.1.2.

4.4.3.2 – Relação entre azoto total nas folhas e nitratos nos pecíolos

Na figura 28 apresenta-se a relação entre o azoto total nas folhas de batateira e a concentração de nitratos nos pecíolos. Os dados foram organizados por datas de amostragem, independentemente dos anos de ensaio. Assim, na figura 28a são colocadas as leituras efectuadas até 20 DAE, na figura 28b as leituras efectuadas entre 21 e 35 DAE e na figura 28c as leituras posteriores a 35 DAE. Desta forma, procurou-se detectar alterações na relação entre os dois indicadores do estado nutritivo ao longo da estação de crescimento.

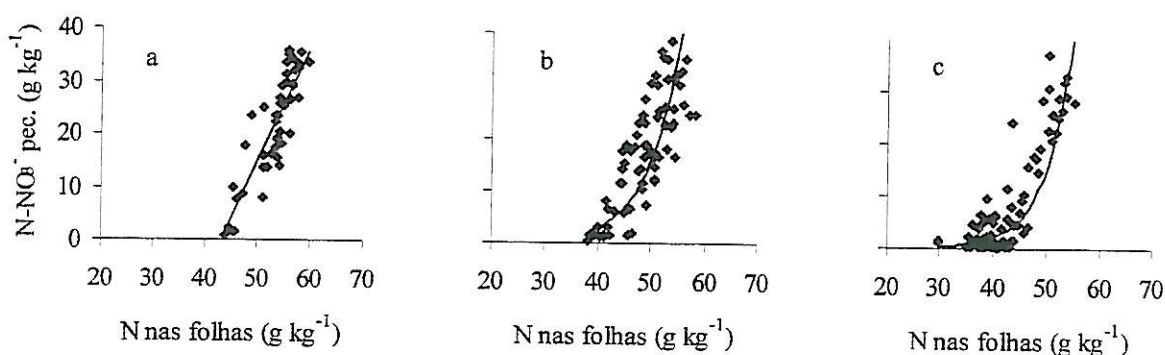


Figura 28 – Relação entre o azoto total nas folhas e a concentração de nitratos nos pecíolos. Colheitas até (a) 20 DAE, (b) de 21 a 35 DAE e (c) posteriores a 35 DAE.

Nas primeiras datas de amostragem (figura 28a) a relação é linear. Ambos os indicadores parecem responder directamente ao azoto disponível. O azoto absorvido acima das necessidades imediatas das plantas é armazenado nos tecidos condutores, na forma de nitratos, e nas folhas, na forma de compostos azotados assimilados ou não (Millard e Marshall, 1986). Em fases mais avançadas do ciclo (figura 28c), a relação denota um decréscimo mais que proporcional do teor de nitratos nos pecíolos relativamente ao azoto total nas folhas. O resultado demonstra que os nitratos nos pecíolos são inteiramente uma forma de reserva, enquanto uma parte importante do azoto das folhas resiste à remobilização para as partes em crescimento por se encontrar em estruturas vitais para a planta. Esta indicação tinha sido já obtida pela relação entre o azoto aplicado e o resultado dos indicadores na planta (4.4.2.1 e 4.4.2.2).

A fracção do azoto total que se acumula como reserva inclui, necessariamente, uma parte dos nitratos presentes nos pecíolos e nervuras das folhas. Isto porque o azoto determinado pelo método Kjeldhal inclui a quase totalidade do azoto orgânico e uma fracção variável e reduzida dos nitratos presentes (Peterson e Chesters, 1964; Young *et al.*, 1993).

4.4.3.3 – Relação entre nitratos nos pecíolos e valores de clorofila SPAD

Na organização da figura 29 utilizaram-se os critérios seguidos no ponto anterior relativamente às datas de amostragem.

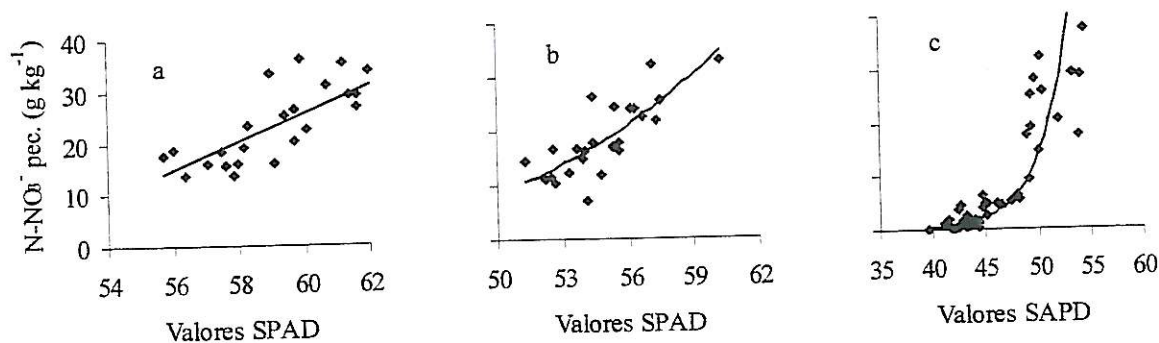


Figura 29 – Relação entre os valores SPAD e o teor de nitratos nos pecíolos: (a) 10 DAE; (b) 18 DAE; e (c) 34 e 42 DAE.

A relação entre os valores SPAD e o teor de nitratos nos pecíolos evidencia uma tendência exponencial desde as primeiras datas de amostragem. Esta relação traduz os factos do teor de clorofila não responder ao consumo de luxo e do pigmento ter um carácter eminentemente funcional, por oposição aos nitratos nos pecíolos, que são uma forma de reserva. Westcott e Wraith (1995) encontraram uma relação idêntica entre os valores SPAD nas folhas e o teor de nitratos em caules de hortelã-pimenta. Os autores escolheram o modelo linear descontínuo para estabelecer a relação entre os dois indicadores.

4.4.3.4 – Relação entre azoto total nas folhas e valores de clorofila SPAD

Na relação entre o azoto nas folhas e os valores SPAD (figura 30), o modelo linear constituiu-se como o melhor ajustamento em qualquer data de amostragem, a avaliar pelos coeficientes de determinação obtidos. Outros investigadores encontraram relações lineares significativas entre estes dois indicadores do estado nutritivo, em culturas como o milho (Schepers *et al.*, 1992; Smeal e Zhang, 1994; Sims *et al.*, 1995), o trigo (Fox *et al.*, 1994) e a festuca alta (Kantety *et al.*, 1996).

O resultado traduz o facto de a maior parte do azoto das células se encontrar associado às moléculas de clorofila (Lopez-Cantarero *et al.*, 1994), ficando aparentemente justificada a relação linear entre os dois componentes. Por outro lado, demonstra que a perda de compostos

azotados de reserva em situação de deficiência de azoto também é acompanhada por redução dos teores de clorofila.

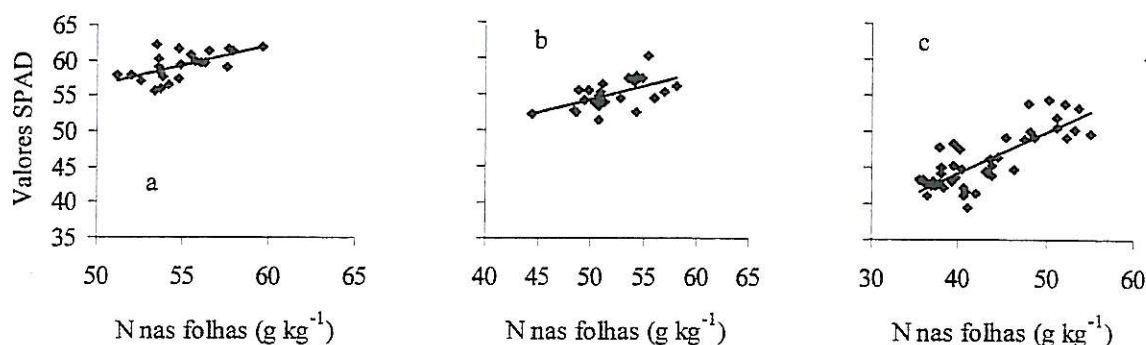


Figura 30 – Relação entre o azoto total nas folhas e os valores SPAD: (a) 10 DAE; (b) 18 DAE; e (c) 34 e 42 DAE.

4.4.4 – Determinação de níveis críticos dos indicadores do estado nutritivo e da disponibilidade de azoto inorgânico no solo

Os níveis críticos para os diversos indicadores do estado nutritivo foram determinados, de forma analítica, com base nos modelos matemáticos que traduzem a relação entre os indicadores e a produção relativa, e por um procedimento gráfico. A utilização de valores relativos da produção (produção percentual relativamente à modalidade de fertilização mais produtiva) permite remover grande parte da variabilidade interanual da produção e o efeito de outros factores que condicionam o potencial produtivo da cultura (Pierre *et al.*, 1977 b).

O processo analítico é exemplificado na figura 31. Define-se o modelo que melhor se ajusta à nuvem de pontos e determina-se o valor do indicador correspondente a 90 % da produção relativa. Para os diferentes indicadores do estado nutritivo e datas de amostragem, foram utilizadas as equações linear, $y = a + bx$, e exponencial assintótica, $y = 100(1 - b e^{-cx})$. Os níveis críticos são obtidos resolvendo as equações para $y = 90$, ficando

$$x = (90 - a)/b$$

e

$$x = -\ln(0,1/b)/c$$

nos modelos linear e exponencial assintótico, respectivamente.

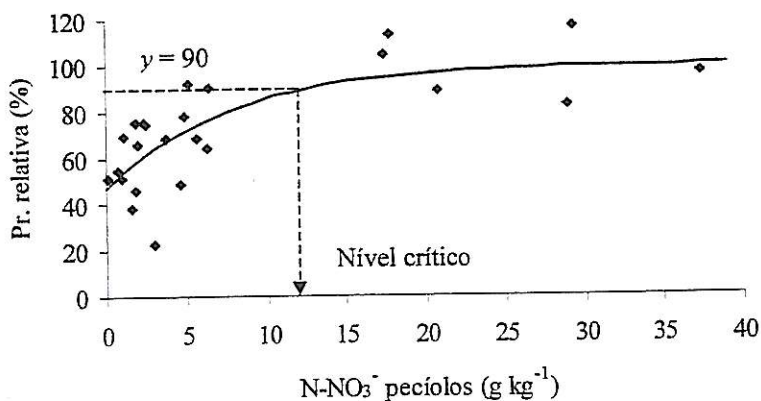


Figura 31 – Determinação dos níveis críticos pelo método analítico. Neste exemplo, os dados referem-se à concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e respeitam à amostragem de 34 DAE de 1998.

Pelo método gráfico utilizou-se a técnica de Cate-Nelson modificada. A linha horizontal fixou-se no valor correspondente a 90 % da produção relativa. A linha vertical define o nível crítico e posicionou-se de forma a que a quantidade máxima de pontos ficasse nos quadrantes positivos (figura 32). As razões que levaram à utilização da técnica de Cate-Nelson modificada foram discutidas em 2.3.6.1.

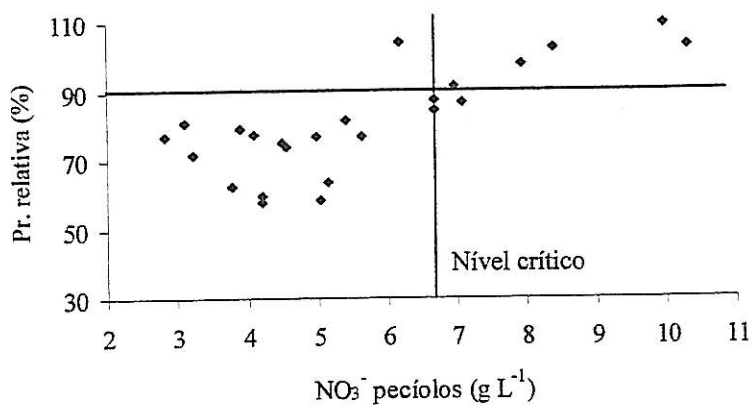


Figura 32 – Determinação dos níveis críticos pelo método gráfico. Neste exemplo os dados referem-se à concentração de nitratos nos pecíolos (método expedito) e respeitam à amostragem de 18 DAE de 1998.

4.4.4.1 – Nitratos nos pecíolos (método laboratorial)

No quadro 14 apresentam-se as equações e os coeficientes de determinação que traduzem os ajustamentos entre o teor de nitratos nos pecíolos e a produção relativa em função das datas

de amostragem e dos anos de ensaio. São também apresentados os níveis críticos determinados pelos métodos analítico e gráfico, tal como descritos anteriormente.

Quadro 13 – Níveis críticos para a concentração de nitratos nos pecíolos ($\text{g N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$) determinada pelo método laboratorial.

Ano	Data (DAE)	Método analítico			Método gráfico	
		Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1996	20	$y = 66,946 + 0,844 x$	0,36	27,3	25,0	16,7
	35	$y = 77,627 + 0,766 x$	0,43	16,2	11,0	20,8
	48	$y = 100(1 - 0,223 \text{ EXP}(-0,128 x))$	0,41	6,2	2,5	16,7
1997	15	$y = 45,587 + 1,561 x$	0,65	28,5	28,0	8,3
	28	$y = 100(1 - 0,534 \text{ EXP}(-0,086 x))$	0,65	19,5	18,5	8,3
	42	$y = 100(1 - 0,527 \text{ EXP}(-0,131 x))$	0,56	12,7	6,3	12,5
1998	10	$y = 45,608 + 1,511 x$	0,53	29,4	26,0	12,5
	18	$y = 48,257 + 1,756 x$	0,63	23,8	24,0	4,2
	34	$y = 100(1 - 0,307 \text{ EXP}(-0,126 x))$	0,57	8,9	4,8	8,3
					Total erros	12,0

Nas primeiras datas de amostragem, os dados ajustaram-se a um modelo rectilíneo. À medida que a estação de crescimento progrediu, a relação entre a concentração de nitratos nos pecíolos e a produção relativa mostrou tendência para exponencial assintótica. Esta alteração traduz o facto dos nitratos serem utilizados pelas plantas até à exaustão, quando os níveis de azoto no solo diminuem. Por outro lado, quando estão disponíveis no solo em quantidades abundantes são absorvidos e armazenados nos tecidos das plantas em níveis elevados.

Porter e Sisson (1991 a) verificaram que, nas primeiras datas de amostragem (40 a 43 DAP), a relação entre a concentração de nitratos nos pecíolos das batateiras e a produção relativa foi linear. Mais tarde (48 a 53 DAP), o melhor ajustamento foi conseguido com equações quadráticas. Singh (1993) e Errebhi *et al.* (1998) apresentam resultados semelhantes. O ajustamento quadrático pode ser considerado como uma fase intermédia entre o modelo linear e o exponencial assintótico.

Os níveis críticos determinados pelo processo analítico foram ligeiramente superiores aos do método gráfico. Ware *et al.* (1982) verificaram a mesma tendência nos seus resultados. A justificação deverá ser procurada nas diferenças entre as duas metodologias, designadamente na maior sensibilidade do método matemático ao aparecimento de pontos extremos na nuvem de pontos. Black (1993) considera que quando se fala de níveis críticos deve ser tida em conta

a metodologia utilizada na sua determinação. Os resultados agora apresentados parecem indicar também nesse sentido.

A qualidade do diagnóstico é avaliada pelo coeficiente de determinação no método matemático e pela percentagem de estimativas erradas no método gráfico. A percentagem de estimativas erradas contabiliza as situações em que seria recomendado azoto não sendo necessário e vice-versa. Pelo quadro 13 verifica-se que a qualidade do diagnóstico não melhorou de forma inequívoca ao longo da estação de crescimento. Singh (1993) verificou, também, que a determinação do teor de nitratos nos pecíolos permite detectar carências de azoto muito cedo (antes de 25 DAP), pelo que o atraso na decisão de se aplicar ou não azoto em cobertura não conduz a um ganho de precisão de diagnóstico.

Os níveis críticos determinados pelo método gráfico conduziram a um valor médio de estimativas erradas de 12,0 %. Os valores anuais foram de 18,1, 9,7 e 8,3 % em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. A qualidade do diagnóstico de 1996 foi bastante inferior aos restantes anos, quer avaliada pela percentagem de erros quer pelo coeficiente de determinação. A melhoria no resultado em 1997 e 1998 poderá estar relacionado com a diminuição da variabilidade experimental associada à produção de tubérculos. Recorde-se que a dimensão das amostras de campo passou de seis para dezoito plantas a partir do segundo ano de ensaios (3.1.4).

4.4.4.2 – Nitratos nos pecíolos (método expedito)

No quadro 14 apresentam-se os resultados correspondentes ao cálculo dos níveis críticos para os nitratos nos pecíolos determinados pelo RQflex[®].

As equações de ajustamento apresentam as mesmas características que as observadas para os resultados da técnica laboratorial de determinação de nitratos. Os coeficientes de determinação são, também, muito idênticos. A probabilidade de se tomarem decisões de fertilização incorrectas com o RQflex é praticamente igual ao método laboratorial. A percentagem de estimativas erradas passou de 12,0 % para 12,5 %. Os valores anuais foram de 16,7, 11,1 e 9,7 para 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Este resultado traduz a qualidade da relação encontrada na determinação de nitratos nos pecíolos pelos métodos expedito e laboratorial (figura 27).

Quadro 14 – Níveis críticos para a concentração de nitratos nos pecíolos ($\text{g NO}_3^- \text{L}^{-1}$) determinada pelo método expedito.

Ano	Data (DAE)	Método analítico			Método gráfico	
		Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1996	20	$y = 69,642 + 2,324 x$	0,30	8,759	8,850	16,7
	35	$y = 77,657 + 2,202 x$	0,41	5,605	4,200	16,7
	48	$y = 100(1-0,204 \text{ EXP}(-0,286 x))$	0,40	2,490	0,960	16,7
1997	15	$y = 43,014 + 6,062 x$	0,70	7,751	6,600	12,5
	28	$y = 100(1-0,526 \text{ EXP}(-0,313 x))$	0,65	5,304	4,200	8,3
	42	$y = 100(1-0,471 \text{ EXP}(-0,715 x))$	0,59	2,167	1,020	12,5
1998	10	$y = 42,105 + 7,119 x$	0,53	6,728	5,520	12,5
	18	$y = 48,818 + 5,705 x$	0,61	7,219	6,660	8,3
	34	$y = 100(1-0,309 \text{ EXP}(-0,387 x))$	0,58	2,915	1,320	8,3
					Total erros	12,5

4.4.4.3 – Azoto total nas folhas

Os níveis críticos para o azoto total nas folhas são apresentados no quadro 15. Os dados foram ajustados pelo modelo linear para todas as datas de amostragem em todos os anos de ensaio. O resultado reflecte o carácter maioritariamente estrutural do azoto total nas folhas. Gupta e Saxena (1976 b) obtiveram relações lineares, mas também curvilíneas. Contudo, estes investigadores trabalharam apenas datas de amostragem bastante mais avançadas na estação de crescimento, condição que favorece o aparecimento de relações curvilíneas.

Quadro 15 – Níveis críticos para a concentração de azoto total nas folhas (g kg^{-1})

Ano	Data (DAE)	Método analítico			Método gráfico	
		Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1996	20	$y = -10 + 1,983 x$	0,30	50,4	48,5	25,0
	35	$y = 25,146 + 1,409 x$	0,36	46,0	46,3	20,8
	48	$y = 42,262 + 1,178 x$	0,39	40,5	38,0	16,7
1997	15	$y = -140,672 + 4,171 x$	0,72	55,3	54,2	12,5
	28	$y = -110,79 + 4,043 x$	0,68	49,7	51,0	8,3
	42	$y = -41,720 + 2,789 x$	0,50	47,2	41,0	8,3
1998	10	$y = -215,478 + 5,405 x$	0,53	56,5	56,1	8,3
	18	$y = -85,496 + 3,204 x$	0,47	54,8	54,0	8,3
	34	$y = 3,700 + 1,750 x$	0,37	49,3	47,0	8,3
					Total erros	13,0

Tal como tinha sido referido para os nitratos, o método gráfico originou níveis críticos mais baixos que o método matemático. Da mesma forma, as diferenças parecem acentuar-se nas últimas datas de amostragem. Assim, o resultado também parece aconselhar que, na comparação de níveis críticos, se tenha em conta a forma como são determinados.

Com a utilização do azoto total nas folhas como indicador do estado nutritivo das plantas, Gupta e Saxena (1976 b) argumentam que a previsão dos resultados melhora substancialmente nas fases mais avançadas do ciclo. Os resultados agora apresentados não mostram uma melhoria inequívoca da qualidade do diagnóstico ao longo da estação de crescimento. Quando se utiliza o método gráfico, ocorre uma redução na percentagem de estimativas erradas da primeira para a terceira datas de amostragem em 1996 e da primeira para a segunda em 1997. Contudo, o resultado do método analítico parece ser contraditório, já que a qualidade do ajustamento traduzido pelo coeficiente de determinação piora, durante a estação de crescimento, se forem excluídos os dados de 1996.

A qualidade do diagnóstico, avaliada pela percentagem de estimativas erradas, foi de 20,8, 9,7 e 8,3 em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. A quantidade total de erros foi de 13 %. O resultado é de qualidade ligeiramente inferior aos obtidos a partir dos nitratos nos pecíolos, cuja percentagem de estimativas erradas foi de 12,0 e 12,5 para o método laboratorial e expedito, respectivamente.

4.4.4.4 – Valores de clorofila SPAD

Os níveis críticos para as estimativas do teor de clorofila, obtidas com o SPAD-502[®], são apresentados no quadro 16.

Quadro 16 – Níveis críticos para a clorofila SPAD (unidades SPAD).

Ano	Data (DAE)	Método analítico			Método gráfico	
		Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1997	42	$y = -108,810 + 3,915 x$	0,51	50,8	46,0	12,5
	10	$y = -213,934 + 4,981 x$	0,42	61,0	60,5	20,8
1998	18	$y = -213,175 + 5,358 x$	0,54	56,5	56,5	12,5
	34	$y = -63,774 + 3,205 x$	0,53	48,0	45,3	12,5
					Total erros	14,6

O melhor ajustamento entre os valores SPAD e a produção relativa foi conseguido com equações lineares em todas as datas de amostragem e reflecte o carácter estrutural das clorofilas. Resultado idêntico é apresentado por Waskom *et al.* (1996) em milho.

A percentagem de decisões erradas apresenta valores médios superiores aos restantes indicadores. Comparando os resultados, apenas para as datas em que este indicador foi avaliado, obtemos uma percentagem de 9,4, 10,4, 8,3 e 14,6 para nitratos nos pecíolos (método laboratorial), RQflex[®], azoto total e clorofila SPAD, respectivamente.

Com a utilização dos valores SPAD parece haver uma melhoria evidente na qualidade do diagnóstico da primeira para as restantes datas de amostragem. Em diversos estudos foram encontradas incongruências na utilização deste indicador em fases muito precoces do ciclo. Smeal e Zhang (1994) e Waskom *et al.* (1996) não conseguiram encontrar correlações satisfatórias com a produção de milho. Turner e Jund (1991) referem dificuldades idênticas na cultura do arroz e atribuíram o resultado a alguma instabilidade das clorofilas devido ao herbicida. Vos e Bom (1993), utilizando o SPAD-502[®] na cultura da batata, não encontraram diferenças significativas entre modalidades de fertilização em 14 DAE, devido ao carácter prioritário das clorofilas para o azoto disponível. Assim, excluir o nível crítico obtido para 10 DAE afigura-se como uma decisão razoável, apesar das reservas inerentes ao facto de se dispor apenas de resultados de um ano. Esta opção permite uma melhoria na qualidade global do diagnóstico (de 14,6 para 12,5 %) e coloca o indicador num patamar de qualidade mais próximo dos restantes.

São também apresentados os níveis críticos do indicador clorofila SPAD expressos em termos relativos (quadro 17). Os valores SPAD relativos foram obtidos pela expressão

$$\text{SPAD rel} = \text{valores SPAD de campo} / \text{valores SPAD referência} \times 100.$$

Os coeficientes de determinação e a percentagem de estimativas erradas são idênticos entre valores SPAD absolutos e relativos. Também Fox *et al.* (1994) obtiveram a mesma qualidade de diagnóstico em trigo utilizando os valores SPAD absolutos e relativos. Contudo, alguns investigadores referem vantagens inequívocas na utilização de valores SPAD relativos em milho (Piekielek e Fox, 1992) e em batata (Minotti *et al.*, 1994).

Como foi referido, a utilização de valores SPAD relativos surgiu para ultrapassar a variabilidade experimental associada a diferenças nos locais e condições de cultivo e entre híbridos ou cultivares. Como estes factores de variação não estiveram presentes nos ensaios,

provavelmente não puderam ser avaliadas adequadamente as potencialidades desta forma de interpretação dos resultados.

Quadro 17 – Níveis críticos para os valores SPAD relativo (%)

Ano	Data (DAE)	Método analítico			Método gráfico	
		Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1997	42	$y = -108,764 + 2,111 x$	0,51	94,2	85,0	12,5
	10	$y = -214,807 + 3,049 x$	0,42	100,0	98,5	20,8
1998	18	$y = -212,997 + 3,096 x$	0,54	97,9	97,5	12,5
	34	$y = -63,888 + 1,594 x$	0,53	96,5	91	12,5
					Total erros	14,6

4.4.4.5 – Azoto mineral no solo durante a estação de crescimento

Os níveis críticos, para o teor de nitratos no solo durante o ciclo, são apresentados no quadro 18.

Quadro 18 – Níveis críticos para o teor de nitratos no solo ($\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$) durante a estação de crescimento.

Ano	Data (DAE)	Método analítico			Método gráfico	
		Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1997	15	$y = 100(1-0,727 \text{ EXP}(-0,059 x))$	0,70	33,6	32	8,3
	28	$y = 100(1-1,017 \text{ EXP}(-0,125 x))$	0,59	18,6	14,0	12,5
	42	$y = 100(1-0,796 \text{ EXP}(-0,133 x))$	0,50	15,6	13,0	4,2
1998	10	$y = 100(1-0,408 \text{ EXP}(-0,031x))$	0,53	45,4	46,0	8,3
	18	$y = 100(1-0,428 \text{ EXP}(-0,048 x))$	0,47	30,3	30,0	8,3
	34	$y = 100(1-0,275 \text{ EXP}(-0,119 x))$	0,21	8,5	4,0	8,3
					Total erros	8,3

A relação entre o teor de nitratos no solo e a produção relativa foi ajustada pela equação exponencial assintótica. A relação curvilínea traduz o facto dos nitratos poderem descer a níveis bastante baixos pela absorção radicular ou acumular-se no solo como principal forma mineral quando as quantidades são superiores à capacidade de absorção pelas plantas. Na cultura do milho, Doll *et al.* (1971) obtiveram uma relação curvilínea ajustada pelo modelo quadrático.

A percentagem de estimativas erradas apresenta um valor médio de 8,3 para os dois anos de ensaio. Este resultado é de melhor qualidade que qualquer um dos que foram obtidos com os indicadores do estado nutritivo das plantas. Contudo, a comparação deve excluir os dados de 1996. Assim, obteve-se, comparativamente, uma percentagem de erros de 9,0, 10,4, 9,2, 12,5 e 8,3 para nitratos nos pecíolos (método laboratorial), RQflex[®], azoto total nas folhas, valores SPAD (excluindo 10 DAE) e nitratos no solo, respectivamente. Este indicador, amplamente utilizado no milho, parece ter também boas possibilidades de êxito noutras culturas como a batata. Registe-se que, em milho, Sims *et al.* (1995) obtiveram 76 % de estimativas correctas e Heckman *et al.* (1996) registaram 81 %, tendo estes resultados sido considerados satisfatórios.

A utilização do indicador azoto mineral no solo ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) não acrescentou qualidade ao resultado (quadro 20). O coeficiente de determinação do ajustamento para o método analítico e a percentagem de decisões erradas, determinadas pelo método gráfico, são idênticas relativamente ao uso isolado de NO_3^- . Na bibliografia aparecem resultados contraditórios. Meisinger *et al.* (1992) referem existir vantagens na inclusão do NH_4^+ , enquanto Sims *et al.* (1995) obtiveram resultados idênticos com e sem NH_4^+ .

Quadro 19 – Níveis críticos para o azoto mineral no solo ($\text{mg N inorgânico kg}^{-1}$) durante a estação de crescimento.

Ano	Data		Método analítico		Método gráfico	
	(DAE)	Ajustamento	R^2	Nível crítico	Nível crítico	% erros
1997	15	$y = 100(1 - 0,778 \text{ EXP}(-0,056 x))$	0,68	37,3	35,0	8,3
	28	$y = 100(1 - 1,346 \text{ EXP}(-0,129 x))$	0,60	20,2	16,0	12,5
	42	$y = 100(1 - 0,801 \text{ EXP}(-0,116 x))$	0,46	17,9	14,0	4,2
1998	10	$y = 100(1 - 0,432 \text{ EXP}(-0,026 x))$	0,54	56,3	54,0	8,3
	18	$y = 100(1 - 0,446 \text{ EXP}(-0,039 x))$	0,49	38,3	35,0	8,3
	34	$y = 100(1 - 0,409 \text{ EXP}(-0,104 x))$	0,25	13,5	7,5	8,3
					Total erros	8,3

Este resultado justifica algumas considerações relativas à forma de azoto mineral dominante no solo. Em condições que favoreçam a permanência no solo da forma NH_4^+ poderá haver vantagens em que se definam níveis críticos para todo o azoto inorgânico. Nas nossas condições de trabalho, a forma nítrica foi amplamente dominante logo a partir das primeiras datas de amostragem. Tal como tinha sido comentado em 4.4.2.4, a hidrólise da ureia e a posterior nitrificação das formas amoniacais terão sido processos suficientemente

rápidos, transferido a maior parte do protagonismo da nutrição azotada das plantas para a forma nítrica. Contudo, em situações em que não sejam conhecidas convenientemente a forma azotada utilizada como fertilizante e como decorrem as transformações biológicas entre as formas de azoto no solo, poderá ser mais seguro usar os níveis críticos que incluem o NH_4^+ , sobretudo nas primeiras fases do ciclo.

4.4.5 – Variação temporal dos níveis críticos

Nos quadros 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 foram apresentados os níveis críticos para as datas de amostragem reais. De seguida apresenta-se um processo de determinação de níveis críticos em contínuo, para qualquer data de amostragem, ao longo da estação de crescimento.

Na figura 33 exemplifica-se como se obtêm as equações que descrevem a evolução dos níveis críticos com o tempo. Na elaboração da figura utilizam-se todos os dados disponíveis referentes a datas de amostragem e anos de ensaio.

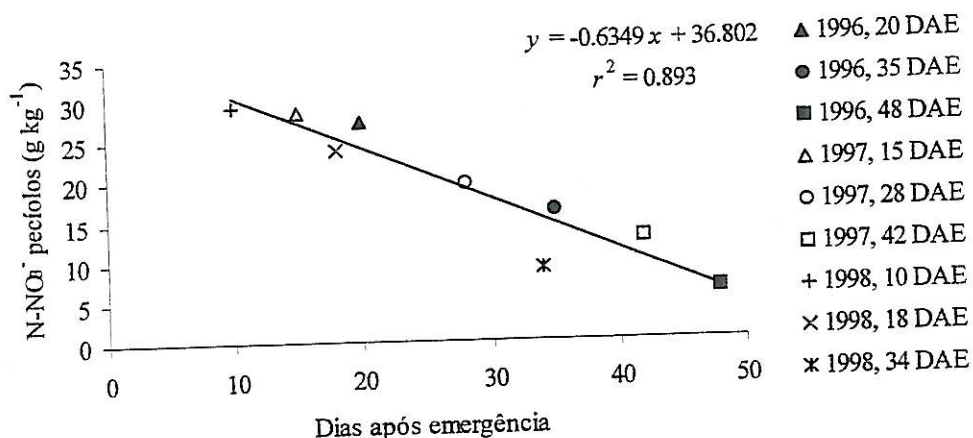


Figura 33 – Variação temporal dos níveis críticos. Dados relativos à concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e níveis críticos obtidos pelo método analítico (dados do quadro 13).

Com base nas equações definidas da forma apresentada na figura 33, determinaram-se os níveis críticos para toda a estação de crescimento. No quadro 20 são apresentadas as equações respectivas a cada indicador do estado nutritivo e de disponibilidade de azoto no solo. São também acrescentados os cálculos para quatro datas representativas para exemplificação. Estes passos destinam-se a facilitar a interpretação dos resultados.

Quadro 20 – Variação dos níveis críticos ao longo da estação de crescimento.

Indicador (unidades)	Método	Ajustamento	r^2	Dias após emergência			
				15	25	35	45
NO ₃ ⁻ pec., lab. (g N kg ⁻¹)	Analítico	$y = -0,635 x + 36,802$	0,89	27,3	20,9	14,6	8,2
	Gráfico	$y = -0,744 x + 36,908$	0,90	25,7	18,3	10,7	3,4
NO ₃ ⁻ pec., RQflex (g NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	Analítico	$y = -0,162 x + 9,932$	0,74	7,5	5,9	4,3	2,6
	Gráfico	$y = -0,182 x + 9,417$	0,69	6,7	4,9	3,0	1,2
N nas folhas (g kg ⁻¹)	Analítico	$y = -0,375 x + 60,396$	0,89	54,8	51,0	47,3	43,5
	Gráfico	$y = -0,453 x + 61,028$	0,91	54,2	49,7	45,2	40,6
Clorofila SPAD* (unidades SPAD)	Analítico	$y = -0,334 x + 62,940$	0,81	57,9	54,6	51,3	47,9
	Gráfico	$y = -0,463 x + 64,400$	0,93	57,5	52,8	48,2	43,6
SPAD-relativo* (%)	Analítico	$y = -0,150 x + 101,110$	0,94	98,9	97,4	95,9	94,4
	Gráfico	$y = -0,392 x + 103,390$	0,96	97,5	93,6	89,7	85,8
NO ₃ ⁻ no solo (mg N kg ⁻¹)	Analítico	$y = -0,974 x + 48,554$	0,78	33,9	24,2	14,5	4,7
	Gráfico	$y = -1,096 x + 49,279$	0,75	32,8	21,9	10,9	0,0
N inorg. no solo (mg N kg ⁻¹)	Analítico	$y = -1,163 x + 58,297$	0,77	40,9	29,2	17,6	6,0
	Gráfico	$y = -1,245 x + 56,599$	0,77	37,9	25,5	13,0	0,6

* excluída a modalidade 10 DAE de 1998.

O decréscimo dos níveis críticos foi ajustado por equações lineares significativas para todos os indicadores. Da informação de que dispomos, este é o tipo de resposta comum para a concentração de nitratos os pecíolos (Roberts e Cheng, 1988; Nitsch e Varis, 1991; Singh, 1993).

As concentrações críticas dos nitratos nos pecíolos (determinação laboratorial) decresceram de forma linear entre 15 a 45 DAE de 27,3 para 8,2 g kg⁻¹ e de 25,7 para 3,4 g kg⁻¹ se determinados pelo método analítico ou gráfico, respectivamente. Diversos investigadores apresentaram valores da mesma ordem de grandeza (Gardner e Jones, 1975; Dow e Roberts, 1982; Westcott *et al.*, 1991; Singh, 1993; Meyer e Marcum, 1998), com variações atribuíveis, sobretudo, ao uso de diferentes cultivares. Contudo, a grande dificuldade em comparar resultados entre investigadores deve-se à utilização de diferentes escalas de desenvolvimento fenológico.

As concentrações críticas para os nitratos nos pecíolos obtidas pelo método expedito variaram de 7 500 a 2 600 mg NO₃⁻ L⁻¹, se determinadas pelo método analítico, e de 6700 a 1200 mg NO₃⁻ L⁻¹, se determinadas pelo método gráfico, no intervalo do ciclo cultural em estudo. Mills e Jones (1996) expressaram os resultados dos nitratos nos pecíolos em tecido

fresco sem serem, necessariamente, determinados por métodos expeditos. Apresentam os resultados para as fases do ciclo: início (*early*); meia (*midseason*); e fim (*late*) de estação. Com base no conceito de intervalo crítico, consideram como suficiente os teores, expressos em NO_3^- , de 12 000, 9 000 e 6 000 ppm e deficiente os valores de 8 000, 6 000 e 3 000 ppm para as fases do ciclo consideradas. Apesar das dificuldades na comparação de resultados, devido ao uso de diferentes escalas fenológicas, parece evidente que os valores por nós apresentados são globalmente inferiores a estes. Gupta e Saxena (1976 a) e Foth e Ellis (1997) sugerem também concentrações críticas de nitratos nos pecíolos globalmente superiores às nossas. As diferenças podem estar associadas a factores genéticos, relacionados com as cultivares, e a diferentes potenciais de produção das regiões.

Os níveis críticos para o azoto total nas folhas decresceram, no intervalo considerado, desde 54,8 a 43,5 g kg^{-1} ou 54,2 a 40,5 g kg^{-1} , consoante determinados pelo método analítico ou gráfico, respectivamente. Mills e Jones (1996) apresentam os resultados para as fases do ciclo em que as plantas têm trinta centímetros de altura e os tubérculos estão a meio do seu desenvolvimento. As concentrações críticas para o primeiro e segundo estado fenológico são 40 a 60 g N kg^{-1} e 30 a 40 g N kg^{-1} , respectivamente. Fageria *et al.* (1997) apresentam, como concentração crítica para a cultura em 42 DAE, valores compreendidos entre 40 e 50 g N kg^{-1} . Atendendo às diferenças nos estados fenológicos utilizados, os resultados apresentados por Mills e Jones (1996) e por Fageria *et al.* (1997) estão globalmente de acordo com os que são apresentados no quadro 20.

Entre 15 e 45 DAE, os valores SPAD críticos variaram entre 57,9 e 47,9 unidades e entre 57,5 e 43,6 unidades quando determinados pelo método analítico ou gráfico, respectivamente. Minotti *et al.* (1994) obtiveram valores críticos compreendidos entre 49 a 56 unidades SPAD entre 29 e 39 DAP, dependendo das cultivares, do local e do ano de ensaio. Estas datas são comparáveis a 15 e 25 DAE. Assim, os resultados de Minotti *et al.* (1994), relativamente aos do quadro 20, são muito próximos na primeira data mas inferiores na segunda. Em 25 DAE os valores críticos foram de 54,6 e 52,8 unidades SPAD, quando determinados pelo método analítico ou gráfico, respectivamente.

Os valores SPAD relativo críticos decresceram desde 98,9 a 94,4 % e desde 97,5 a 85,8 % quando determinados pelo método analítico ou gráfico, respectivamente. Minotti *et al.* (1994) registaram como níveis críticos, em todas as datas, valores de campo em 1 a 2 unidades inferiores aos valores de referência. Isto corresponde a valores críticos de 97 a 98 % aproximadamente. Estes resultados estão de acordo com os apresentados no quadro 20 apenas para a primeira data de amostragem. Os resultados por nós obtidos denotam um decréscimo

evidente nos valores SPAD relativo críticos ao longo da estação de crescimento, o que contraria fortemente a possibilidade de se usar como índice de suficiência crítico o valor de 95 %, tal como foi apresentado em 2.3.7.1.2. Também Piekielek e Fox (1992) e Piekielek *et al.* (1995) obtiveram níveis críticos diferentes de 95 % para estados fenológicos bem definidos na cultura do milho.

Os níveis críticos para o teor de nitratos no solo variaram de 33,9 a 4,7 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ ou 32,8 a 0,0 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹, quando determinados pelo método analítico ou gráfico, respectivamente. Para a cultura do milho têm sido registados valores muito próximos de 20 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ para diversas regiões dos Estados Unidos, quando as plantas têm quinze a trinta centímetros de altura (Sims *et al.*, 1995; Heckman *et al.*, 1996). Em milho silagem, Magdoff *et al.* (1984) determinaram níveis críticos mais elevados, 36 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹. Apesar das dificuldades em comparar escalas fenológicas de duas culturas diferentes e das suas diferentes necessidades em azoto, os resultados das duas culturas parece não diferirem muito. Em 25 DAE, estado fenológico comparável a plantas de milho com 15 a 30 cm de altura, os níveis críticos foram de 24,2 e 21,9 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ para a determinação analítica e gráfica, respectivamente.

Quando se incluiu o NH₄⁺, os níveis críticos aumentaram. O aumento foi proporcional ao contributo desta forma de azoto para o azoto inorgânico total. Sims *et al.* (1995) encontraram níveis críticos de 25 e 17 mg N kg⁻¹ para o azoto inorgânico e para o azoto nítrico isoladamente. Anteriormente (4.4.4.5) foram já discutidas as hipotéticas vantagens da inclusão do NH₄⁺ na determinação dos níveis críticos para a disponibilidade de azoto no solo.

4.4.6 – Quantificação do azoto a aplicar em cobertura

Com a interpretação dos resultados pelos níveis críticos obtém-se informação sobre a necessidade de se aplicar azoto em cobertura. Contudo, ainda não permite quantificar o nutriente a aplicar. Alguns investigadores têm desenvolvido estratégias que permitem quantificar a dose de azoto a aplicar através da relação entre indicadores do estado nutritivo das plantas e a dose óptima de nutriente aplicado em cobertura (Baethgen e Alley, 1989; Singh, 1993; Piekielek *et al.*, 1995; Heckman *et al.*, 1996). Normalmente, utilizam apenas um indicador e elegem estados fenológicos bem definidos. O que vai ser proposto consiste em quantificar a dose a aplicar, utilizando qualquer um dos vários indicadores do estado nutritivo das plantas ou a disponibilidade de azoto no solo. Pretende-se que o esquema funcione para

toda a estação de crescimento ou para qualquer estado fenológico, embora o interesse prático se concentre no início do ciclo.

O primeiro passo consiste em estabelecer a relação entre os indicadores do estado nutritivo e a dose óptima de azoto aplicada em cobertura (figura 34). Tomaram-se, como exemplo, os valores de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) para a data de amostragem 35 DAE do ensaio de 1996. A dose óptima aplicada em cobertura foi determinada em 4.1.4.

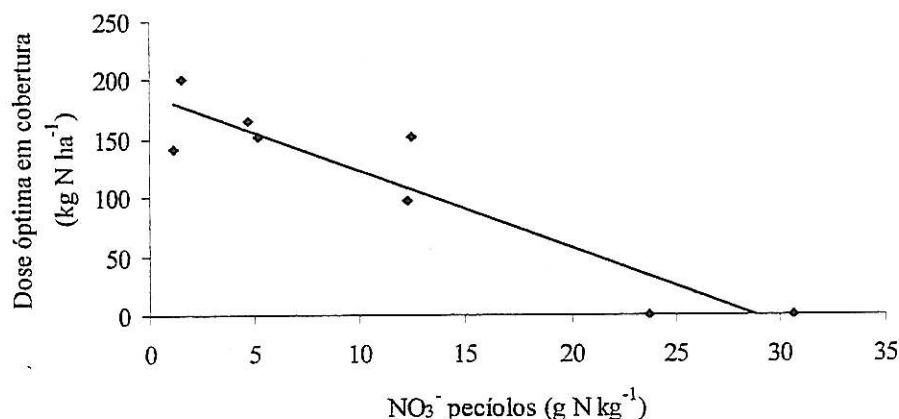


Figura 34 - Relação entre a concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e a dose óptima de azoto em cobertura. Dados da amostragem de 35 DAE de 1996.

No quadro 21 apresentam-se todas as equações de ajustamento do indicador de todas as datas de amostragem dos três anos de ensaio. As datas de amostragem foram organizadas por ordem crescente de DAE, independentemente dos anos.

Com base nas equações do quadro 21 elaborou-se o quadro 22. A quantidade óptima de azoto a aplicar em cobertura é calculada substituindo nas equações a incógnita x por valores teóricos do indicador (definidos em intervalos regulares) em toda a gama de variação natural do indicador. Assim, cada equação do quadro 21, respeitante a cada uma das datas de amostragem, permite formar uma coluna no quadro 22.

Os valores do quadro 22 mostram que as doses de azoto a aplicar em cobertura aumentaram à medida que o teor de nitratos nos pecíolos diminuiu, para qualquer uma das datas de amostragem (evolução nas colunas). Para uma dada concentração de nitratos nos pecíolos, a quantidade de azoto a aplicar em cobertura diminuiu à medida que a estação de crescimento progride, denotando o decréscimo natural do indicador ao longo do ciclo cultural (evolução nas linhas).

Quadro 21 – Relação entre o teor de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e a dose óptima em cobertura para todas as datas de amostragem dos três anos de ensaio.

DAE	Ajustamento	r^2
10***	$y = -6,7601 x + 271,87$	0,36
15**	$y = -4,9515 x + 221,94$	0,50
18***	$y = -6,9057 x + 242,42$	0,34
20*	$y = -7,4477 x + 285,20$	0,80
28**	$y = -5,6807 x + 202,82$	0,69
34***	$y = -6,0729 x + 160,04$	0,64
35*	$y = -6,5023 x + 187,96$	0,86
42**	$y = -6,9760 x + 194,20$	0,81
48*	$y = -7,9235 x + 164,95$	0,83

* dados de 1996; ** de 1997; *** de 1998

Quadro 22 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) nas datas de amostragem reais em função da concentração de nitratos no pecíolos (método laboratorial) definida a intervalos regulares.

NO ₃ ⁻ pecíolos (g N kg ⁻¹)	Dias após plantação								
	10	15	18	20	28	34	35	42	48
40	1,5	23,9	(-33,8)	(-12,7)	(-24,4)	(-82,9)	(-72,1)	(-84,8)	(-152,0)
35	35,3	48,6	0,7	24,5	4,0	(-52,5)	(-39,6)	(-50,0)	(-112,4)
30	69,1	73,4	35,2	61,8	32,4	(-22,1)	(-7,1)	(-15,1)	(-72,8)
25	102,9	98,2	69,8	99,0	60,8	8,2	25,4	19,8	(-33,1)
20	136,7	122,9	104,3	136,2	89,2	38,6	57,9	54,7	6,5
15	170,5	147,7	138,8	173,5	117,6	68,9	90,4	89,6	46,1
10	(204,3)	172,4	173,4	(210,7)	146,0	99,3	122,9	124,4	85,7
5	(238,1)	197,2	(207,9)	(248,0)	174,4	129,7	155,4	159,3	125,3
3	(251,6)	(207,1)	(221,7)	(262,9)	185,8	141,8	168,5	173,3	141,2
1	(265,1)	(217,0)	(235,5)	(277,8)	197,1	154,0	181,5	187,2	157,0

Os números entre parêntesis resultaram directamente do ajustamento pelo modelo linear. Na prática têm o significado de 0 ou 200 kg N ha⁻¹ se são negativos ou superiores a 200, respectivamente.

O último passo consistiu em transformar as datas de amostragem reais de campo do quadro 22 em datas definidas a intervalos regulares. Para isso estabeleceu-se a relação entre as datas de amostragem (10, 15, 18, ..., 48) e o azoto a aplicar em cobertura para cada nível do indicador (linhas do quadro 22). Os resultados são apresentados no quadro 23, para datas de amostragem regulares. Foram usadas, aleatoriamente, as datas 15, 25, 35 e 45 DAE.

Construído o quadro 23, o diagnóstico e a quantificação da necessidade ou complemento da adubação azotada é simples. Se, por exemplo, em 15 DAE, o teor de nitratos nos pecíolos for de 30 g N kg⁻¹, devem ser aplicadas cerca de 60 kg ha⁻¹ de azoto em cobertura. Se, na

mesma data, o teor de nitratos nos pecíolos for menor que 5 g N kg⁻¹, devem ser aplicados, em cobertura, 200 kg N ha⁻¹. Nunca se recomenda o uso de mais de 200 kg N ha⁻¹. Com a informação de que se dispõe, esta quantidade parece assegurar a máxima expressão produtiva e, por outro lado, passaria a ser difícil garantir uma utilização eficiente do nutriente aplicado.

Quadro 23 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base na concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) e na data de amostragem.

NO ₃ ⁻ pecíolos (g N kg ⁻¹)	Ajustamento	r ²	Dias após emergência			
			15	25	35	45
35	$y = -3,769 x + 88,99$	0,89	30	0	0	0
30	$y = -3,632 x + 118,10$	0,90	60	30	0	0
25	$y = -3,496 x + 147,20$	0,90	90	60	20	0
20	$y = -3,359 x + 176,31$	0,89	130	90	60	30
15	$y = -3,222 x + 205,40$	0,86	160	120	90	60
10	$y = -3,086 x + 234,51$	0,81	190	160	130	100
5	$y = -2,949 x + 263,62$	0,75	200	190	160	130
3	$y = -2,894 x + 275,26$	0,72	200	200	170	150
1	$y = -2,840 x + 286,90$	0,69	200	200	190	160

Notas: (i) os resultados foram arredondados para a dezena mais próxima; (ii) para outros DAE utilizar a equação para determinar o N a aplicar; (iii) para outros níveis críticos usar valores médios entre os intervalos propostos.

A parte mais sensível da metodologia está na relação que se consegue entre os indicadores do estado nutritivo e a dose ótima aplicada em cobertura (figura 34). Os restantes passos destinam-se a normalizar os resultados para facilitar a interpretação. Os investigadores que tentaram estabelecer a relação entre indicadores do estado nutritivo e a dose ótima aplicada em cobertura encontraram sempre relações lineares. Como exemplo citam-se Singh (1993), que utilizou, como indicador do estado nutritivo azotado da batateira, o teor em nitratos nos pecíolos, Baethgen e Alley (1989) com base no azoto total nas folhas de trigo, Piekielek *et al.* (1995) utilizando valores SPAD no milho e Heckman *et al.* (1996) com base nos nitratos no solo imediatamente antes da data de cobertura (PSNT).

A maior perturbação nos resultados foi introduzida pela modalidade de fertilização N_f100. Nesta modalidade foram calculadas doses de azoto a aplicar em cobertura mais elevadas do que os indicadores do estado nutritivo sugeriam à partida. As razões foram já discutidas em 4.1.4. Contudo, os resultados destas modalidades não foram excluídos porque, mesmo assim, os ajustamentos lineares conseguidos foram sempre significativos.

Os quadros que se seguem (quadros 24, 25, 26, 27, 28 e 29) dizem respeito aos resultados finais do azoto a aplicar em cobertura para os restantes indicadores, seguindo as etapas referidas para o indicador nitratos nos pecíolos (método laboratorial).

Os resultados apresentados nos quadros 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29 foram calculados admitindo a mesma eficiência de uso de azoto para qualquer data de amostragem. Contudo, por precaução, e enquanto mais informação não estiver disponível, sugerimos que, após 35 DAE, as doses utilizadas não ultrapassem os 100 kg N ha⁻¹, seja qual for o estado nutritivo das plantas ou a disponibilidade de azoto no solo. Com o objectivo de se conhecer melhor a eficiência de uso do azoto aplicado ao longo da estação de crescimento, estão a ser conduzidos novos ensaios de campo (no âmbito do PAMAF 6107) que vão permitir introduzir refinamentos nas estratégias de fertilização para as diferentes fases do ciclo.

Quando se utilizar o indicador clorofila SPAD, deve-se aplicar a totalidade do azoto recomendado numa só cobertura. Os estudos de Vos e Bom (1993) mostraram que este indicador reage com pouca sensibilidade às aplicações de azoto de cobertura. Desta forma, não é possível potenciar as vantagens das aplicações multifraccionadas, utilizadas sobretudo em fertirrigação, e que permitem o ajustamento progressivo do estado nutritivo das plantas aos níveis críticos. Esta hipotética limitação da utilização do SPAD-502[®] está também a ser especificamente estudada nos novos ensaios em curso.

Quadro 24 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base na concentração de nitratos nos pecíolos (método expedito) e na data de amostragem.

NO ₃ ⁻ pecíolos (g NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	Ajustamento	r ²	Dias após emergência			
			15	25	35	45
10	y = -2,004 x + 52,364	0,33	20	0	0	0
9	y = -2,094 x + 76,333	0,40	40	20	0	0
8	y = -2,184 x + 100,30	0,48	70	50	20	0
7	y = -2,274 x + 124,27	0,56	90	70	40	20
6	y = -2,364 x + 148,24	0,63	110	90	70	40
5	y = -2,453 x + 172,21	0,69	140	110	90	60
4	y = -2,543 x + 196,18	0,74	160	130	110	80
3	y = -2,633 x + 220,15	0,77	180	150	130	100
2	y = -2,723 x + 244,12	0,77	200	180	150	120
1	y = -2,813 x + 268,09	0,76	200	200	170	140
0,5	y = -2,858 x + 280,07	0,75	200	200	180	150

Ver notas do quadro 23.

Quadro 25 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base no azoto nas folhas e na data de amostragem.

N nas folhas		r^2	Dias após emergência			
(g kg ⁻¹)	Ajustamento		15	25	35	45
58	$y = -4,035 x + 85,78$	0,87	30	0	0	0
56	$y = -4,541 x + 128,74$	0,94	60	0	0	0
54	$y = -5,048 x + 171,69$	0,95	100	50	0	0
52	$y = -5,554 x + 214,65$	0,94	130	90	30	0
50	$y = -6,061 x + 257,61$	0,91	170	140	70	10
48	$y = -6,567 x + 300,56$	0,88	200	180	110	40
44	$y = -7,581 x + 386,48$	0,81	200	200	150	70
40	$y = -8,594 x + 472,39$	0,75	200	200	180	100
36	$y = -9,607 x + 558,31$	0,70	200	200	200	130
32	$y = -10,620 x + 644,22$	0,66	200	200	200	160
28	$y = -11,633 x + 730,13$	0,63	200	200	200	190

Ver notas do quadro 23.

Quadro 26 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base nos valores SPAD e na data de amostragem.

Clorofila SPAD		r^2	Dias após emergência			
(unidades SPAD)	Ajustamento		15	25	35	45
60	$y = -4,186 x + 70,78$	0,80	10	0	0	0
58	$y = -4,512 x + 115,67$	0,79	50	0	0	0
56	$y = -4,837 x + 160,56$	0,78	90	40	0	0
54	$y = -5,162 x + 205,45$	0,78	130	80	20	0
52	$y = -5,487 x + 250,34$	0,77	170	110	60	0
50	$y = -5,813 x + 295,23$	0,76	200	150	90	30
48	$y = -6,138 x + 340,12$	0,76	200	190	130	60
46	$y = -6,463 x + 385,00$	0,75	200	200	160	90
44	$y = -6,788 x + 429,89$	0,75	200	200	190	120
42	$y = -7,113 x + 474,78$	0,75	200	200	200	150
40	$y = -7,439 x + 519,67$	0,74	200	200	200	180

Ver notas do quadro 23.

Os ajustamentos conseguidos entre datas de amostragem e aplicações de azoto em cobertura, para cada nível do indicador azoto inorgânico no solo (NO₃⁻ e NO₃⁻ + NH₄⁺), apresentam coeficientes de determinação muito baixos à medida que a estação progride e o azoto mineral no solo diminui (quadros 29 e 30). São os níveis muito baixos de azoto mineral no solo para que tendem todas as modalidades de fertilização que dificultam a utilização destas metodologias. Nesta perspectiva, não se recomenda o uso destes indicadores depois de 25 a 30 DAE. Por outro lado, estas datas correspondem, no milho, aproximadamente ao

estado fenológico 15 a 30 cm de altura das plantas, para o qual se tem preconizado com bons resultados o *presidedress nitrate test*.

Relembra-se também aqui que, quando não se dispuser da informação em dias após emergência, se pode utilizar a informação do quadro 12 para converter escalas fenológicas e/ou cronológicas.

Quadro 27 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base nos valores SPAD-relativo e na data de amostragem.

SPAD-relativo (%)	Ajustamento	r ²	Dias após emergência			
			15	25	35	45
99	y = -1,703 x + 99,04	0,87	70	60	40	20
97	y = -1,945 x + 125,44	0,95	100	80	60	40
95	y = -2,187 x + 151,83	0,98	120	100	80	50
93	y = -2,429 x + 178,23	1,00	140	120	90	70
91	y = -2,671 x + 204,64	1,00	160	140	110	80
89	y = -2,913 x + 231,02	0,99	190	160	130	100
87	y = -3,156 x + 257,42	0,97	200	180	150	120
85	y = -3,398 x + 283,81	0,96	200	200	160	130
83	y = -3,640 x + 310,24	0,94	200	200	180	150
81	y = -3,882 x + 336,60	0,93	200	200	200	160
79	y = -4,124 x + 363,00	0,91	200	200	200	180
77	y = -4,366 x + 389,40	0,89	200	200	200	190

Ver notas do quadro 23.

Quadro 28 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base no teor de nitratos no solo e na data de amostragem.

NO ₃ ⁻ no solo (mg N kg ⁻¹)	Ajustamento	r ²	Dias após emergência			
			15	25	35	45
50	y = -15,224 x + 238,12	0,74	10	0	0	0
45	y = -13,645 x + 233,66	0,73	30	0	0	0
40	y = -12,066 x + 229,19	0,71	50	0	0	0
35	y = -10,487 x + 224,72	0,70	70	0	0	0
30	y = -8,908 x + 220,26	0,67	90	0	0	0
25	y = -7,329 x + 215,79	0,64	110	30	0	0
20	y = -5,750 x + 211,32	0,59	130	70	10	0
15	y = -4,171 x + 206,86	0,50	140	100	60	20
10	y = -2,592 x + 202,39	0,35	160	140	110	90
5	y = -1,013 x + 197,93	0,10	180	170	160	150
1	y = 0,250 x + 194,40	0,01	200	200	200	200

Ver notas do quadro 23.

Quadro 29 – Adubação de cobertura (kg N ha⁻¹) com base no azoto inorgânico no solo e na data de amostragem.

N inorg. no solo (mg N kg ⁻¹)	Ajustamento	r ²	Dias após emergência			
			15	25	35	45
60	$y = -17,095 x + 263,69$	0,88	10	0	0	0
50	$y = -14,031 x + 251,02$	0,87	40	0	0	0
40	$y = -10,968 x + 238,35$	0,86	70	0	0	0
30	$y = -7,905 x + 226,68$	0,84	110	30	0	0
25	$y = -6,373 x + 219,34$	0,81	120	60	0	0
20	$y = -4,841 x + 213,01$	0,76	140	90	40	0
15	$y = -3,309 x + 206,67$	0,66	160	120	90	60
10	$y = -1,778 x + 200,33$	0,41	170	160	140	120
5	$y = -0,246 x + 194,00$	0,20	190	190	190	180
1	$y = 0,980 x + 188,93$	0,02	200	200	200	200

Ver notas do quadro 23.

4.4.7 – Efeito da adubação de cobertura na concentração de nitratos nos pecíolos

Na figura 35 apresenta-se a variação na concentração de nitratos nos pecíolos (método laboratorial) antes e após a adubação de cobertura. Foram usados apenas os dados de 1998. Os dados de 1997 apresentam características de variação similares, de forma que se considerou desnecessário incluí-los na figura 35. No anexo 7.10, encontram-se os resultados completos de 1997 e 1998. Em 1996 não foram efectuadas determinações tardias do estado nutritivo das plantas.

Os níveis de nitratos nos pecíolos nas duas datas de amostragem iniciais dependeram da dose e formas de azoto utilizadas na fertilização de fundo. As aplicações de cobertura atenuaram o ritmo a que a concentração de nitratos decresceu ou originaram uma reversão temporária (acréscimo) na concentração de nitratos nos pecíolos, dependendo da dose de azoto utilizada. Resultados idênticos para a mesma cultura foram obtidos por Westcott *et al.* (1991), Porter e Sisson (1993) e Vos e Bom (1993).

A variação no teor de nitratos nos pecíolos com a fertilização de fundo e em cobertura demonstra a capacidade da planta em manter níveis elevados de nitratos nos pecíolos até datas muitas avançadas no ciclo. Questiona, também, a ideia generalizada de que o teor de nitratos nos pecíolos decresce com o tempo. O decréscimo pareceu dever-se, apenas, à redução da disponibilidade de azoto mineral no solo e é uma contingência das técnicas de fertilização correntes em que os fertilizantes são aplicados em fundo ou nas fases iniciais do ciclo.

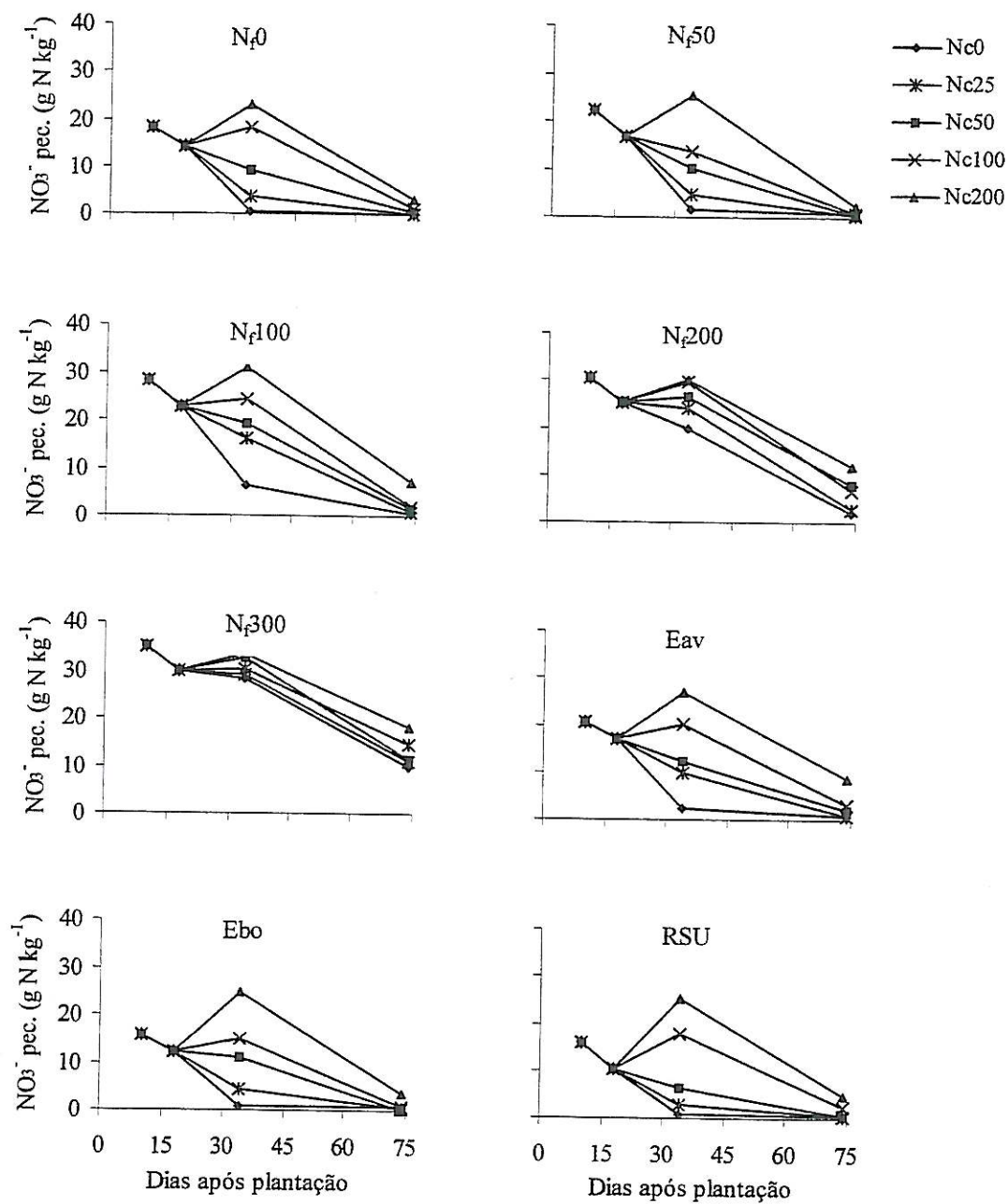


Figura 35 – Variação na concentração de nitratos nos pecíolos em função do azoto aplicado em fundo e em cobertura. Dados de 1998.

A elevada flutuação que ocorre na concentração dos nitratos nos pecíolos com a disponibilidade de azoto no meio reforça a ideia de que os nitratos se constituem como uma forma de reserva para a planta. Pomares-Garcia e Pratt (1978 b) consideram esta característica vantajosa, na perspectiva do teor de nitratos ser utilizado como indicador do estado nutritivo

azotado, na medida em que revela sensibilidade a pequenas diferenças na disponibilidade de azoto no meio.

A grande variação no teor de nitratos nos pecíolos que ocorreu entre 18 e 34 DAE demonstra que a ureia, no Verão e em regadio, é uma fonte de azoto adequada para aplicações de cobertura. É fácil de incorporar (com a rega) e o azoto fica rapidamente disponível pela hidrólise da ureia e também pela nitrificação das formas amoniacais dela resultantes. Nestas condições, parece infundada a suspeita de Roberts *et al.* (1989), autores que referem que a concentração de nitratos nos pecíolos pode subestimar a disponibilidade de azoto no solo quando se aplicam formas amoniacais ou, como neste caso, se convertam em formas amoniacais. De qualquer forma, fica a chamada de atenção para se evitarem datas de amostragem muito próximas de adubações de cobertura com formas de azoto amoniacal ou ureico, quando se pretender avaliar o estado nutritivo das plantas através dos nitratos nos pecíolos. De parte fica a possibilidade de se usar o indicador nitratos nos pecíolos quando as plantas são sujeitas a adubação foliar. Nestas condições, os nutrientes são assimilados nas folhas antes de atingirem os tecidos condutores (Justes *et al.*, 1997).

4.4.8 – Efeito da adubação de cobertura na concentração de azoto total nas folhas

Na figura 36 apresentam-se os resultados para o indicador azoto total nas folhas. Foram igualmente utilizados apenas os dados de 1998. A informação completa encontra-se no anexo 7.10.

As características de variação do azoto total nas folhas em função do azoto aplicado em fundo e em cobertura são idênticas aos nitratos nos pecíolos. As amplitudes de variação são, contudo, menores e os teores mínimos de azoto nas folhas nunca se aproximam de zero. Estas diferenças devem-se ao facto, já mencionado, de que enquanto os nitratos são inteiramente uma forma de reserva, parte do azoto total integra estruturas vitais da folha.

As aplicações de azoto em cobertura permitem alterar o ritmo de decréscimo ou levar a aumentos da concentração de azoto total nas folhas. Apesar das menores amplitudes de variação, o indicador parece apresentar também grande sensibilidade às aplicações de azoto em cobertura.

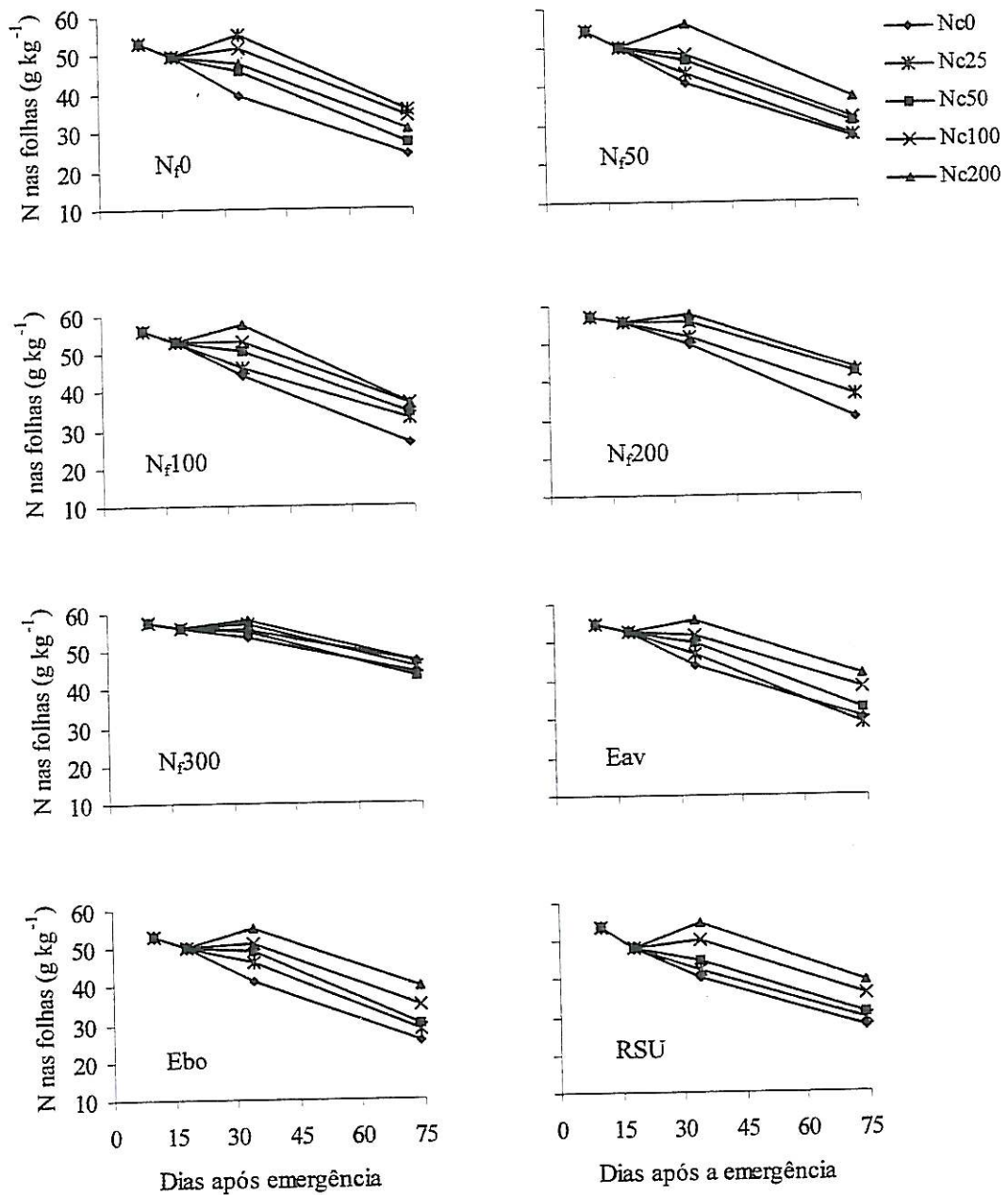


Figura 36 – Variação na concentração de azoto total nas folhas em função do azoto aplicado em fundo e em cobertura. Dados de 1998.

4.5 – Recuperação de azoto residual pela cultura intercalar

4.5.1 – Azoto inorgânico residual no solo no início do Outono

Na figura 37 apresentam-se os resultados do efeito da fertilização da batata no azoto mineral residual no fim da estação de crescimento. No anexo 7.12 encontram-se os registos de campo e no, anexo 7.15.11, os resultados da análise de variância.

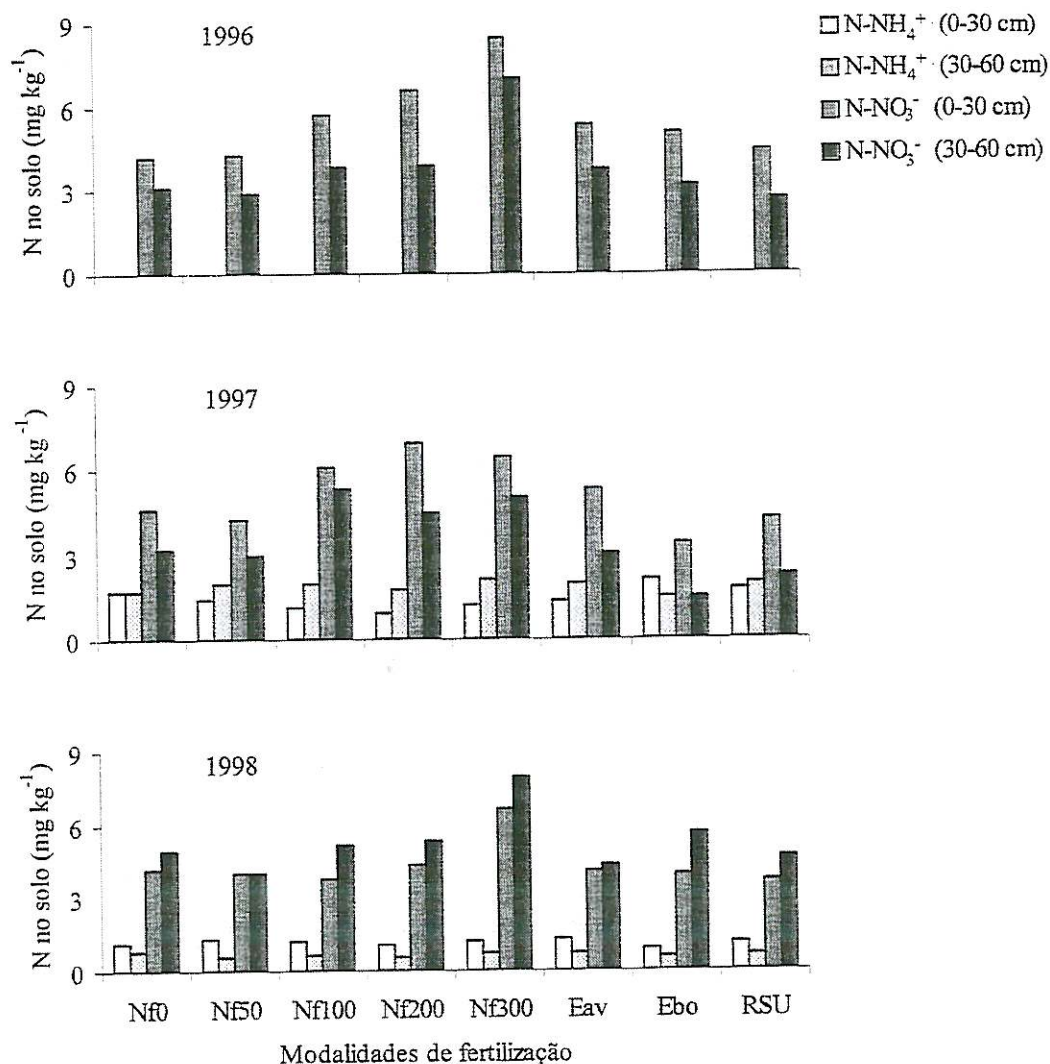


Figura 37 – Azoto mineral residual no solo após a colheita da cultura da batata.

Em Outubro de 1996 ocorreram diferenças significativas nos níveis de nitratos no solo nas profundidades 0-30, 30-60 e 0-60 cm entre as modalidades de fertilização de fundo da cultura da batata. Nas modalidades mais fertilizadas com ureia foram registados os valores de nitratos no solo mais elevados. Esta tendência manteve-se no anos seguintes, apesar de, em 1997, as diferenças não terem sido significativas para um nível de significância de 0,05. As probabilidades associadas foram de 0,14, 0,06 e 0,07 para os nitratos no solo nas profundidades 0-30, 30-60 e 0-60 cm, respectivamente. Em 1998, as diferenças nos níveis de nitratos no solo foram significativas nas profundidades 30-60 e 0-60 cm. Na profundidade 0-30 cm a probabilidade associada foi de 0,051.

A ocorrência de diferenças estatísticas entre modalidades de fertilização traduz o facto de uma parte significativa do azoto dos fertilizantes não ser recuperado pelas plantas, sobretudo nas modalidades mais fertilizadas. As diferenças de N-NO₃⁻ no solo (0-60 cm) entre a

modalidade mais fertilizada e a testemunha foram de 29,3, 13,4 e 19,8 kg N ha⁻¹ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

A partir de 1997 foi também determinado o NH₄⁺. Os valores de N-NH₄⁺ não diferiram significativamente entre modalidades de fertilização. O resultado seria esperado, na medida em que esta forma de azoto não se acumula nestes solos. Forma-se por mineralização dos substractos orgânicos e rapidamente é absorvido pelas plantas, imobilizado pelos microrganismos ou nitrificado.

Os valores de azoto mineral seguiram a tendência referida para os nitratos, dada a constância dos valores de N-NH₄⁺ e ao seu menor significado relativo. Os resultados da análise de variância encontram-se no anexo 7.15.11.

Entre fertilizantes orgânicos não ocorreram diferenças significativas. O posicionamento destas modalidades relativamente à fertilização com ureia não evidencia qualquer tendência para aumentar a disponibilidade de azoto mineral em fases avançadas do ciclo. Os valores médios mantêm-se próximos das modalidades testemunha e N_f50.

Em 1998, os valores de N-NO₃⁻ foram mais elevados na camada 30-60 cm, contrariamente ao que tinha acontecido nos anos anteriores. Atendendo a que se formam predominantemente na camada superficial, a partir das formas orgânicas por amonificação e nitrificação, o seu posicionamento em 1998 justificam-se pela intensa precipitação ocorrida (50 mm) imediatamente antes da colheita de terras. Desta forma, terá sido iniciado o processo de lixiviação dos nitratos, movimentando-se das camadas superficiais para as mais profundas.

4.5.2 – Avaliação do estado nutritivo das plantas durante o Inverno

O estado nutritivo azotado das plantas à saída do Inverno foi avaliado através da concentração de nitratos e do azoto total nas plantas. Os resultados são apresentados no quadro 30.

Utilizando, como indicador do estado nutritivo, o azoto total nas plantas, apenas em 1999 foram registadas diferenças significativas. Quando foi usado o teor de nitratos nas plantas, não foi possível detectar diferenças com significado estatístico.

A concentração em nitratos é um indicador que aparece associado à utilização de tecidos condutores como os pecíolos e os caules. Em folhas ou plantas inteiras, normalmente determina-se como indicador do estado nutritivo o azoto total (2.3.4.2). Nesta fase, em que as plantas não apresentam tecidos condutores bem diferenciados, o azoto total parece ser um indicador mais sensível que a concentração em nitratos.

Quadro 30- Nitratos e azoto total nas plantas no fim do Inverno.

Modal.	N total (g kg ⁻¹)			Nitratos (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Fertil.						
N _f 0	2,86	2,92	3,02 c*	93,3	44,7	74,6
N _f 50	3,03	3,11	3,39 b	129,4	116,5	63,7
N _f 100	2,80	3,08	3,44 ab	87,5	108,4	47,0
N _f 200	2,91	2,95	3,60 ab	129,9	98,7	128,0
N _f 300	2,77	2,99	3,90 a	102,9	113,8	194,1
Eav	2,87	2,97	3,01 c	111,9	39,6	54,5
Ebo	2,87	2,69	3,13 c	101,6	35,7	22,0
RSU	3,02	2,89	3,48 ab	145,8	56,1	36,4
	ns	ns		ns	ns	ns

* - médias a que corresponde a mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Fisher's LSD ($\alpha < 0,05$);
ns - não significativa.

A ausência de diferenças significativas entre modalidades de fertilização em 1997 e 1998 é atribuída à grande quantidade de precipitação ocorrida no Outono e início de Inverno nesses anos (figura 5), impedindo que o estado nutritivo das plantas evidenciasse as diferenças detectadas no azoto mineral no solo. A quantidade de precipitação ocorrida na estação húmida é, frequentemente, utilizada para justificar diferenças no valor residual do azoto mineral entre estações de crescimento ou entre regiões (Paauw, 1963). A perda de azoto durante períodos de precipitação excessiva é normalmente atribuída à lixiviação e desnitrificação de nitratos (Meyer e Marcum, 1998). O Outono e o Inverno de 1998/99 foram particularmente secos, permitindo que fossem registadas diferenças no estado nutritivo das plantas em Fevereiro de 1999.

4.5.3 – Biomassa produzida e azoto exportado

No quadro 31 apresentam-se os resultados da produção de biomassa, da concentração de azoto nas plantas e do azoto exportado pelo tritcale na data de corte.

Em 1999 ocorreram diferenças significativas na produção de biomassa entre modalidades de fertilização. As modalidades a que corresponderam maiores doses de azoto aplicadas um ano antes originaram produções mais elevadas. Em 1997 e 1998 não ocorreram diferenças significativas.

A produção de biomassa esteve de acordo com a informação fornecida pela avaliação do estado nutritivo das plantas em Fevereiro e as diferenças entre modalidades de fertilização

foram possíveis pelo reduzido volume de água veiculado pela precipitação durante todo o período outono/inverno.

Quadro 31 – Biomassa, concentração de azoto na planta e azoto exportado pelo triticale.

Modal. fertilização	Mat. seca (Mg ha ⁻¹)			N na planta (g kg ⁻¹)			N exportado (kg ha ⁻¹)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
N _f 0	2,92	0,89	4,75 c*	10,2	15,6	9,6	29,1	13,9	45,6 c
N _f 50	3,56	1,54	6,33 abc	9,3	16,8	10,4	33,2	26,2	65,5 ab
N _f 100	3,84	1,59	5,64 bc	9,4	16,4	10,0	35,3	26,1	56,3 bc
N _f 200	4,68	1,56	7,07 ab	9,3	17,3	10,2	43,0	26,9	72,1 ab
N _f 300	3,62	1,20	7,29 a	9,4	17,4	10,9	34,0	20,6	79,6 a
Eav	3,95	1,51	5,34 c	9,5	16,2	10,4	37,2	24,2	55,4 bc
Ebo	3,59	2,29	5,15 c	9,3	14,6	10,8	33,1	33,4	55,5 bc
RSU	3,14	1,94	5,55 bc	8,9	15,0	10,6	27,9	29,6	58,8 bc
	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns	

*- médias a que corresponde a mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Fisher's LSD ($\alpha < 0,05$);
ns - não significativa.

Em 1999, a produção de biomassa foi superior aos anos anteriores, sobretudo a 1998. Em 1997, um final de ciclo muito seco comprometeu a produtividade da intercalar. Refira-se que para se obter biomassa que justificasse o corte foram efectuadas duas regas em Abril, como foi referido em 3.2.2. Em 1998 a produção foi comprometida pela data de sementeira. Um Outono/Inverno muito chuvoso não permitiu a sementeira da intercalar antes de 23 de Janeiro. O frio excessivo nesta época do ano impediu uma emergência adequada da cultura, ficando fortemente comprometida a produção.

Os fertilizantes orgânicos não mostraram qualquer efeito positivo significativo na produção de biomassa. O aumento da duração do período em análise não permitiu detectar, ainda, as hipotéticas vantagens da sua utilização.

O teor de azoto nas plantas não diferiu entre tratamentos, mostrando pouca sensibilidade para detectar pequenas diferenças nas condições de desenvolvimento das plantas durante o ciclo. Em 1998, os valores foram bastante mais elevados relativamente a 1997 e 1999. Este resultado só pode ser atribuído às características do material vegetal analisado. Em 1998, devido à má emergência, a biomassa era dominada por infestantes que se desenvolveram na ausência da cultura.

As diferenças encontradas no azoto exportado reflectem as diferenças na biomassa produzida, uma vez que o azoto nas plantas não diferiu significativamente. O azoto exportado pela cultura variou entre 13,9 e 79,6 kg ha⁻¹, para as modalidades N_f0 de 1997 e N_f300 de 1999, respectivamente.

4.5.4 – Azoto inorgânico residual no solo na Primavera

Na figura 38 apresentam-se os resultados do teor de nitratos no solo, referentes às diferentes modalidades de fertilização na batata, na situação de solo nu e na presença da cultura intercalar. Os resultados das diferentes modalidades de fertilização foram comparadas através de análises de variância individualmente para cada uma das situações: solo nu e presença da intercalar. Os resultados encontram-se nos anexos 7.15.13 e 7.15.14. A avaliação comparativa entre a situação de solo nu e com a intercalar foi feita através do teste t-Student. Os resultados encontram-se no anexo 7.15.15. Nos anexos 7.15.13, 7.15.14 e 7.15.15 foram também incluídos os resultados estatísticos referentes aos teores de N-NH₄⁺ e N mineral no solo para os anos de 1998 e 1999.

Na situação de solo nu, a comparação dos resultados entre modalidades de fertilização de fundo da cultura da batata indicou não haver diferenças estatísticas no N-NO₃⁻ no solo. O mesmo resultado foi obtido na presença da intercalar. Estes resultados demonstram que, mesmo na ausência de plantas, pelo menos algum do azoto mineral que se encontrava no solo em Outubro do ano anterior foi perdido durante o Inverno, não se encontrando diferenças significativa em Abril. O resultado é atribuído a lixiviação e desnitrificação de nitratos.

Na situação de solo nu e na profundidade 0-30 cm, os valores de 1997 foram superiores aos de 1998 e sobretudo aos de 1999. Na camada inferior (30-60 cm) parece não haver diferenças apreciáveis. Este resultado poderá ser justificado pela Primavera particularmente seca desse ano, como já foi referido, o que terá permitido uma maior acumulação de nitratos no solo.

Na presença de plantas, a tendência é a mesma. Na camada superficial foram registados valores mais elevados em 1997 relativamente a 1998 e sobretudo a 1999. No entanto, a justificação pode não ser inteiramente a mesma referida para o solo nu. A somar às diferenças no potencial de lixiviação, a presença de uma cultura bem desenvolvida, com uma densidade adequada, terá contribuído para os valores particularmente baixos registados em 1999.

A comparação da situação de solo nu com a presença de triticales é feita na figura 38, utilizando o teor de nitratos no solo. O significado estatístico do resultado foi denotado pelo

teste t-Student (anexo 7.15.15). As diferenças de N-NO_3^- no solo (0-60 cm) entre as modalidades com triticales e em solo nu foram de 45,6, 34,5 e 28,7 kg N ha^{-1} em 1997, 1998 e 1999, respectivamente.

Para a concentração de N-NH_4^+ no solo, não ocorreram diferenças estatísticas. A presença de plantas não alterou os níveis de N-NH_4^+ no solo relativamente à situação de solo nu. Este resultado demonstra a grande dinâmica do NH_4^+ e fornece indicação de que são os microrganismos os seus principais utilizadores, pelo menos quando os níveis do ião no solo são baixos. Os mecanismos envolvidos serão a nitrificação e a imobilização biológica.

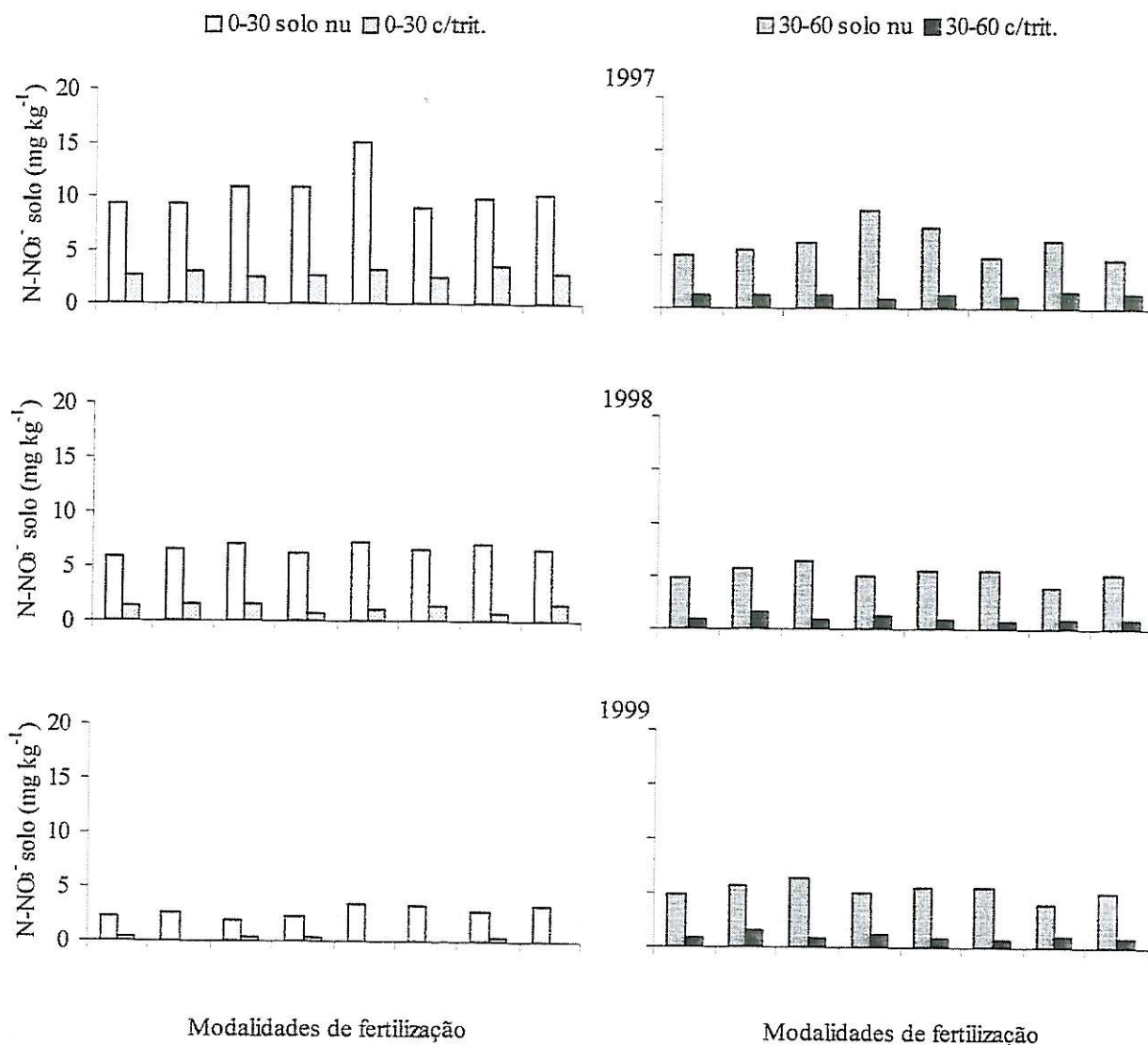


Figura 38 – Valores de N-NO_3^- no solo em Abril na situação de solo nu e com triticales.

A cultura intercalar foi pouco eficiente na recuperação do azoto inorgânico residual presente no solo no início do Outono. Apenas em 1998/1999 foi possível detectar diferenças significativas no estado nutritivo das plantas e na produção. Contudo, este foi um ano incomum. No início da Primavera era referenciado como um dos invernos mais secos do século. Alguns resultados também aparentemente menos bons foram encontrados por outros investigadores (Beckwith *et al.*, 1998; Ferrero e Vidotto, 1998) e as justificações foram, basicamente, as mesmas. Em climas de Verão seco, a sementeira tem de ser feita após o início das chuvas, já muito próxima do Inverno. As temperaturas baixas que se seguem limitam o desenvolvimento das culturas e a recuperação do azoto residual. Por outro lado, o excesso de precipitação conduz à lixiviação e, eventualmente, à desnitrificação de nitratos.

A introdução de culturas intercalares tem dado bons resultados nos países do Centro e Norte da Europa (2.1.5.3). O regime hídrico permite a sementeira em Agosto/Setembro, logo após a saída da cultura principal, podendo a intercalar atingir um desenvolvimento aceitável antes do Inverno.

A espécie utilizada pode não ter sido, também, a mais adequada. Alguns investigadores mostraram que as crucíferas podem atingir taxas de crescimento mais elevadas durante o Inverno (Vos e Putten, 1994; van Dam, 1994). Em Portugal existe uma crucífera vulgarmente usada como cultura forrageira, o nabo (*Brassica rapa*), que, nesta perspectiva, pode ser uma alternativa aos cereais.

Trindade (1997) refere que, no Minho, existe uma técnica cultural tradicional que consiste em semear as culturas intercalares *a coberto* do milho. Desta forma, seria possível semear bastante mais cedo. Contudo, o autor acrescenta que esta técnica tem sido inviabilizada pelo uso dos herbicidas de acção residual. Outra forma de semear mais cedo é recorrendo à rega. Normalmente, o maior problema é que o solo não está livre. A duração da estação de crescimento é um factor limitante para a maior parte das situações culturais do país, se forem excluídos os cereais outono/inverno.

A intercalar terá sido eficiente a recuperar o azoto que gradualmente se mineralizou durante a Primavera. Neste período, o risco de ocorrerem precipitações excessivas ainda é elevado. As plantas mantiveram os níveis de azoto mineral no solo muito baixos, relativamente à situação de solo nu, recuperando até 80 kg N ha⁻¹ no ano em que houve um bom desenvolvimento da cultura (em 1999). Por outro lado, é fácil admitir situações culturais em que mais azoto possa ser recuperado. A situação cultural ensaiada foi de apenas um ligeiro excesso de azoto na cultura da batata num solo com níveis baixos de matéria orgânica. Se atendermos, também, a que nem todo o azoto residual no início do Outono está na forma

mineral (Hansen e Djurhuus, 1996; Mary, 1997), a intercalar afigura-se como uma técnica cultural importante na redução do potencial de lixiviação e desnitrificação de nitratos, apesar de ter sido pouco eficiente a recuperar o azoto inorgânico residual nas condições destes ensaios.

4.6 – Avaliação da disponibilidade de azoto no solo

4.6.1 – Azoto exportado e produção de tubérculos

O azoto exportado e/ou a produção das culturas são os principais métodos de avaliar a disponibilidade de azoto no solo. A relação entre o azoto exportado e a produção de tubérculos é apresentada na figura 39. Os dados ajustam-se ao modelo linear, sendo a probabilidade associada à análise de variância da regressão altamente significativa ($p = 0,000$). O coeficiente de determinação respectivo foi de 0,79.

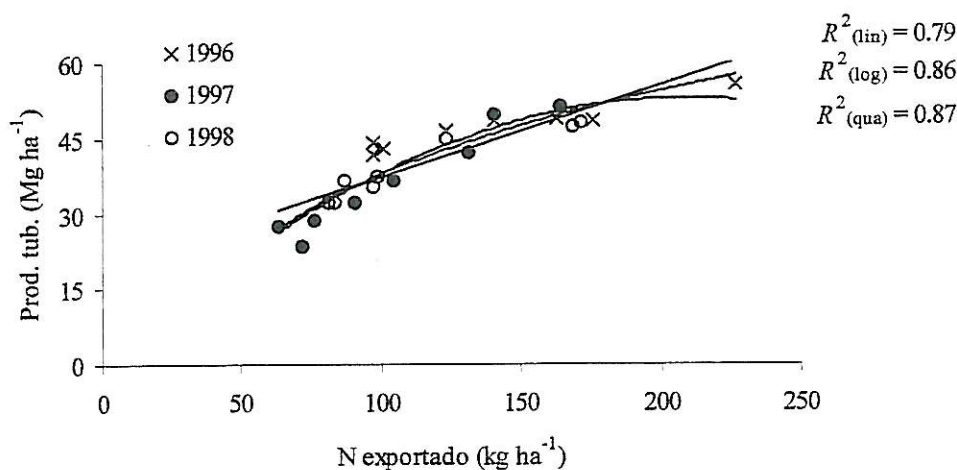


Figura 39 – Relação entre azoto exportado e produção de tubérculos. Ajustamentos: linear (lin); logarítmico (log); e quadrático (qua).

A relação linear explica-se pelo facto do azoto ter sido um factor limitante, com efeito decisivo na produção de tubérculos. Ao aumento da disponibilidade de azoto no solo, as plantas respondem com aumentos simultâneos de azoto exportado e produção.

Apesar do ajustamento linear ser significativo, a distribuição das observações (formada pelos resultados dos três anos) dá indicação de que a evolução da produção de tubérculos é menos que proporcional ao aumento no azoto exportado. Esta é uma característica típica das

curvas de saturação. Desta forma, os modelos logarítmico e quadrático originaram coeficientes de determinação mais elevados (figura 39).

Atendendo à rápida saturação da produção de tubérculos, à medida que a disponibilidade de azoto no solo aumenta, elegeu-se o azoto exportado como o indicador biológico preferencial para avaliar a qualidade dos métodos de incubação laboratorial e dos testes químicos.

4.6.2 – Incubação *in situ*

4.6.2.1 – Azoto mineral no solo

Na figura 40 apresentam-se os valores de $N-NH_4^+$ nos 14 cm superficiais do solo ao longo das estações de crescimento de 1997 e 1998.

A modalidade fertilizada com ureia apresentou valores significativamente mais elevados que as restantes modalidades na primeira data de amostragem de 1997 e na primeira e segunda datas de amostragem de 1998 (anexo 7.15.16). A elevada quantidade de NH_4^+ presente no solo terá resultado directamente da hidrólise da ureia. Esta transformação é particularmente rápida, desde que esteja assegurada temperatura e humidade adequada (Gasser, 1964; Overrein e Moe, 1967), podendo estar terminada ao fim de 10 dias à temperatura de 20 °C (Giroux, 1984).

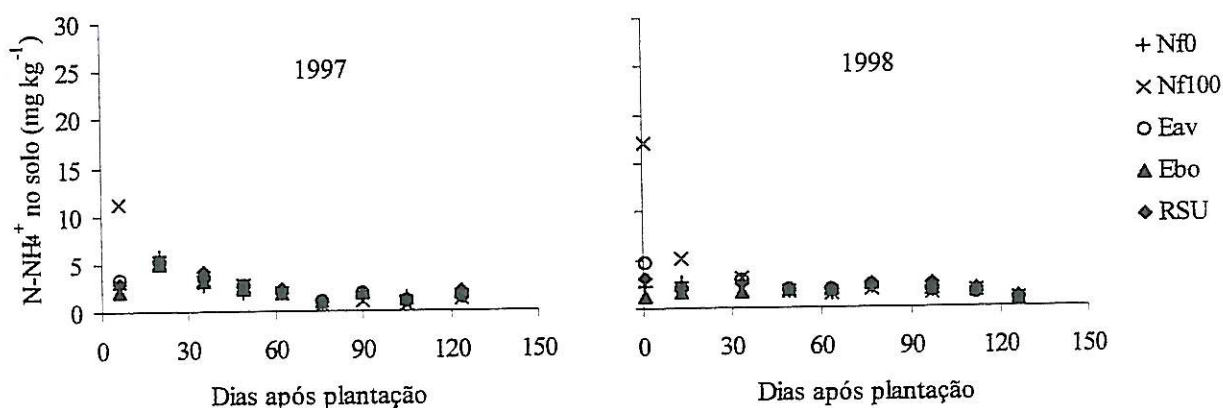


Figura 40 – Evolução dos níveis de $N-NH_4^+$ no solo durante a estação de crescimento.

Na primeira data de amostragem, os valores de NH_4^+ de 1998 foram mais elevados que os de 1997. Relembre-se que em 1997 houve um atraso de seis dias desde a plantação até ao início das incubações, enquanto em 1998 aquelas tiveram início no dia seguinte à plantação. Assim, decorreram 7 e 2 dias, respectivamente, desde a aplicação da ureia até à primeira colheita de terras. Como teoria explicativa, admite-se que em 6 DAP, a taxa de nitrificação nos 14 cm superficiais era já superior à taxa de amonificação da ureia. Por um lado, porque as quantidades de ureia utilizadas (100 kg N ha^{-1}) não terão sido suficientes para inibir a nitrificação, e por outro porque, durante esses 6 dias, a precipitação (55,5 mm nos 4 dias que antecederam a primeira colheita de terras) terá arrastado em profundidade ureia não hidrolisada, diminuindo a formação de NH_4^+ na camada superficial. A partir da terceira data de amostragem (decorridos mais de trinta dias após plantação), os tratamentos com ureia apresentavam valores idênticos aos fertilizantes orgânicos e à modalidade testemunha. Nesta data, já todo o NH_4^+ em excesso tinha sido nitrificado.

Entre os fertilizantes orgânicos e a modalidade testemunha não foi possível detectar diferenças significativas nos níveis de N-NH_4^+ . Contudo, o estrume de aviário apresentou valores médios mais elevados na primeira data de amostragem. A presença de bastante azoto mineral neste material (anexo 7.15.16) e, seguramente, algum azoto orgânico facilmente mineralizável justificam o resultado.

Os valores foram decrescendo lentamente durante a estação de crescimento em todas as modalidades. Nas fases iniciais, os valores mais elevados terão estado associados ao arejamento do solo, em consequência das mobilizações associadas à plantação. A partir da metade do ciclo, os valores estabilizaram entre 1 e $2 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ sem diferenças estatísticas entre modalidades.

Na figura 41 apresenta-se a variação de N-NO_3^- no solo durante a estação de crescimento para os tratamentos fertilizantes ensaiados.

As modalidades fertilizadas com ureia apresentaram valores de N-NO_3^- estatisticamente superiores aos restantes tratamentos na primeira data de amostragem de 1997 e 1998. Em 1996 os resultados da ureia na primeira data de amostragem foram estatisticamente superiores aos restantes tratamentos, excluindo o estrume de aviário (anexo 7.15.17). Em 1997, os valores de N-NO_3^- foram particularmente elevados. O resultado é justificado pelo atraso deste ano no início das incubações, tempo suficiente para permitir a nitrificação de parte apreciável do NH_4^+ resultante da hidrólise da ureia. Em 1996 e 1998 não seria de esperar grande quantidade de nitratos na primeira data de amostragem, na medida em que tinham passado apenas dois dias desde a aplicação da ureia.

Em 1997, o nível de nitratos no solo decresceu desde a primeira data de amostragem. O resultado pode ser justificado pela lixiviação de nitratos (37 mm de precipitação nos quatro dias que se seguiram à primeira colheita de terras) acompanhada de absorção pelas plantas. Em 20 DAP, data da segunda leitura, já as plantas tinham seis dias de idade (6 DAE). Em 1996 e 1998, a segunda data (11 e 13 DAP, respectivamente) seria o momento teórico de maior acumulação de nitratos. Contudo, apesar de se confirmar a suposição e das diferenças para os restantes tratamentos serem significativas, esperavam-se níveis de nitratos mais elevados. Em 1998, entre a primeira e a segunda leitura, a precipitação excedeu 90 mm, com 40 mm concentrados em 12 DAP (1 de Junho), um dia antes da segunda colheita. A lixiviação será, pois, a principal justificação para o resultado. A partir desta data, a diminuição dos níveis de nitratos é atribuída à absorção radicular.

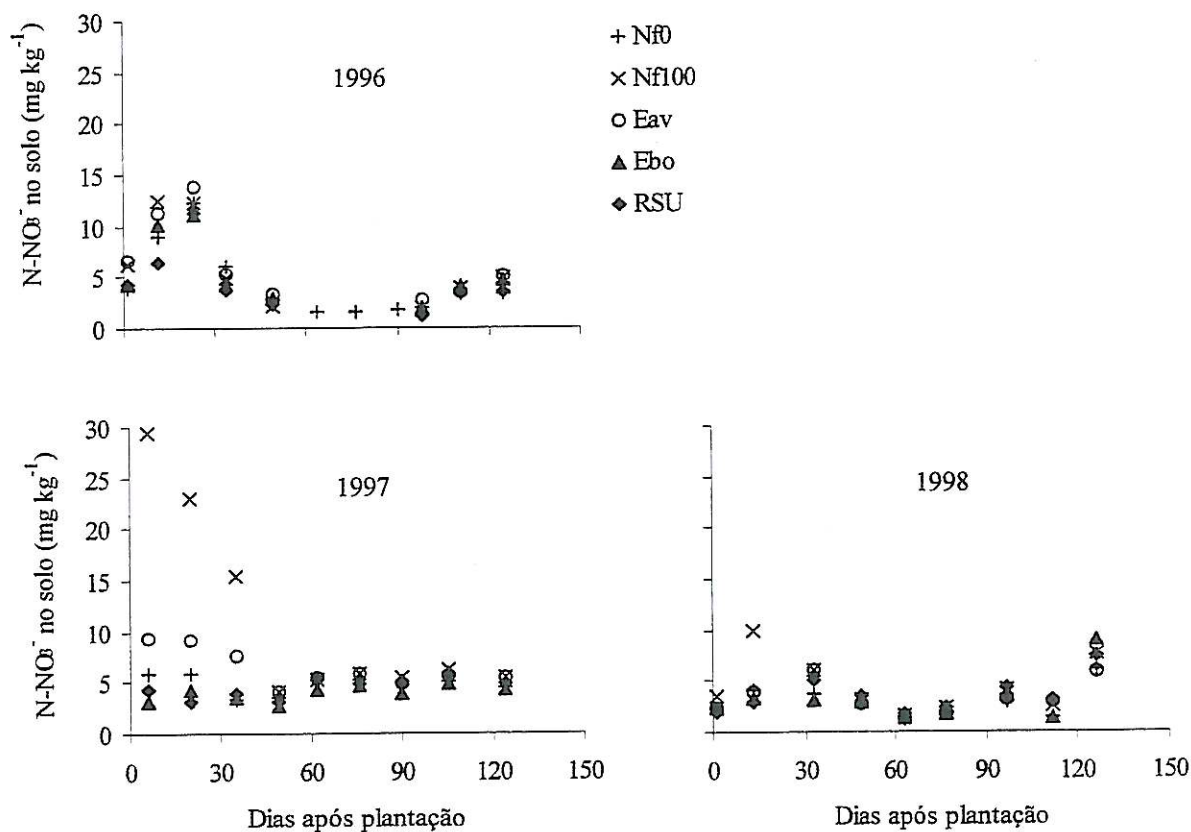


Figura 41 – Evolução dos níveis de N-NO₃⁻ no solo durante a estação de crescimento.

Para 1996 é de difícil justificação um valor tão baixo na segunda data de amostragem. Contudo, pode ser referido que esse período do ano decorreu particularmente seco, a ponto de ter sido considerado indispensável regar imediatamente após o início da emergência das

plantas. Como a nitrificação se reduz apreciavelmente à medida que os solos dessecam, podendo nestas circunstâncias acumular-se NH_4^+ (Harris, 1988), a explicação avançada é a seguinte. Nos primeiros 10 dias a nitrificação foi mínima, tendo eventualmente sido acumulado NH_4^+ (não determinado). Em 10 DAP efectuou-se uma pequena rega para garantir a eficácia do herbicida. Este humedecimento do solo foi aproveitado para proceder a um novo período de incubação (em 11 DAP). Nesta data não foi ainda detectada a acumulação de nitratos. Na terceira data de amostragem (23 DAP), também já não foi possível detectar o suposto excesso de nitratos associado à fertilização com ureia, por se terem já iniciado as regas (anexo 7.7) e as plantas se encontraram em 9 DAE, com bastante capacidade para absorver azoto.

O estrume de aviário apresentou valores médios superiores aos restantes tratamentos nas primeiras datas de amostragem, excluída a modalidade com ureia. As diferenças foram, por vezes, significativas (anexo 7.15.17). Os resultados são justificados pela elevada quantidade de azoto mineral e pela menor razão C/N relativamente aos restantes correctivos orgânicos.

Na modalidade testemunha, nas primeiras datas de amostragem, os valores de nitratos no solo em 1996 foram superiores aos dos outros anos. Este resultado sugere que terá havido maior disponibilidade natural de azoto no solo. Esta tese tem sido suportada com as indicações fornecidas pela produção, azoto exportado e indicadores do estado nutritivo.

Na segunda metade do ciclo vegetativo, os níveis de nitratos no solo foram baixos e idênticos em todas as modalidades. Foram atingidos valores mínimos próximos de $2 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$. Nesta fase, os nitratos formados nas camadas superficiais são activamente absorvidos pelas plantas ou lixiviados a maior profundidade pela água de rega.

Próximo do fim da estação de crescimento parece haver de novo tendência para se elevarem os níveis de nitratos. Este aspecto é particularmente visível em 1996 e 1998. A diminuição na taxa de absorção de nitratos e a paragem da rega podem justificar este resultado.

4.6.2.2 – Taxas de amonificação e nitrificação

As taxas de amonificação líquida e de nitrificação líquida medem a variação diária no teor de NH_4^+ e NO_3^- , respectivamente, em cada período de incubação durante a estação de crescimento. Os resultados são apresentados nas figuras 42 e 43. Os valores das taxas de amonificação e nitrificação são representados no ponto médio de cada período de incubação.

Assim, se um dado período de incubação decorreu entre 6 e 20 DAP, os valores obtidos foram colocados na posição 13 DAP da abcissa da figura.

A modalidade fertilizada com ureia apresentou taxas de amonificação líquidas significativamente mais negativas que os restantes tratamentos na primeira data de amostragem de 1997 e na primeira e segunda datas de amostragem de 1998 (anexo 7.15.18). O resultado traduz o consumo de NH_4^+ , devido à nitrificação. Em 1997, o valor da primeira data foi menos negativo que em 1998 (figura 42). Em 1997, a incubação iniciou-se em 6 DAP e parte do NH_4^+ formado pela hidrólise da ureia já teria sido nitrificado.

Durante a estação de crescimento, as taxas de amonificação começaram por ser negativas, sobretudo em 1998, e estabilizaram próximas de zero nas fases mais avançadas (figura 42). Este resultado indica que, durante a preparação do solo, terá ocorrido amonificação líquida. O arejamento provocado pelas operações de mobilização terão estimulado a amonificação, elevando os níveis de NH_4^+ no solo. As taxas de amonificação negativas que se seguiram traduzem o retorno ao equilíbrio natural do solo, sendo nitrificado ou imobilizado o NH_4^+ em excesso.

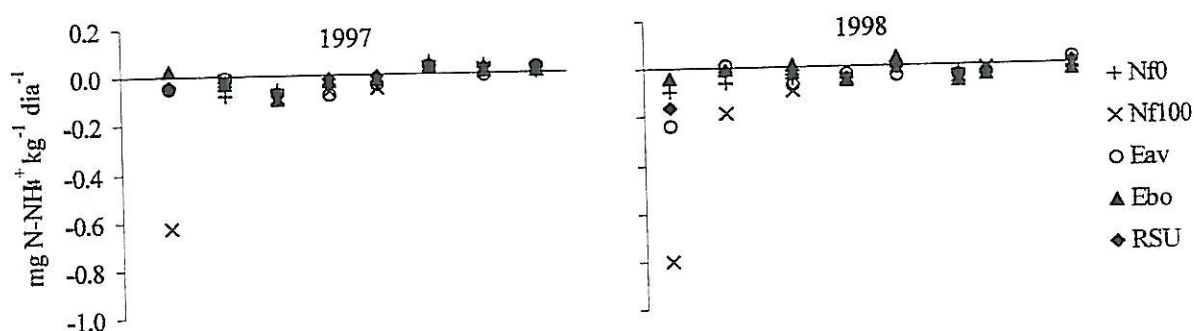


Figura 42 – Taxas de amonificação durante a estação de crescimento

As taxas de nitrificação (figura 43) estão em pleno acordo com os resultados apresentados na figura 42 para 1997 e 1998. De facto, ao desaparecimento do NH_4^+ está associada a formação de nitratos. A nitrificação parece ter sido, assim, o principal destino do NH_4^+ . Em 1996 as taxas de nitrificação são da mesma ordem de grandeza que as dos anos posteriores. Contudo, não se dispõe de taxas de amonificação.

Os dados da figura 43 suportam a tese de que, em 1998, a lixiviação foi a principal causa do desaparecimento dos nitratos no solo na camada 0-14 cm, uma vez que na incubação foi detectada nitrificação e fora dos tubos não foi registada acumulação de N-NO_3^- . Os dados

da figura 43 concorrem, também, para reforçar a tese de que em 1997 parte dos nitratos já tinham sido formados em 6 DAP, porque a taxa de nitrificação posterior nos tubos foi bastante modesta. Estes argumentos tinham sido usados para justificar os resultados da figura 41.

Em 1996, a incubação denota a formação de quantidade apreciável de nitratos (figura 43). Contudo, não foi possível detectá-los na camada superficial na análise ao azoto mineral (figura 41). Na tentativa de justificar estas incongruências, admite-se que dentro dos frascos de incubação (hermeticamente fechados) alguma humidade que as terras ainda continham foi conservada e a nitrificação não terá sido inibida de forma tão evidente como no exterior, onde a perda de água ocorreu em muito maior extensão.

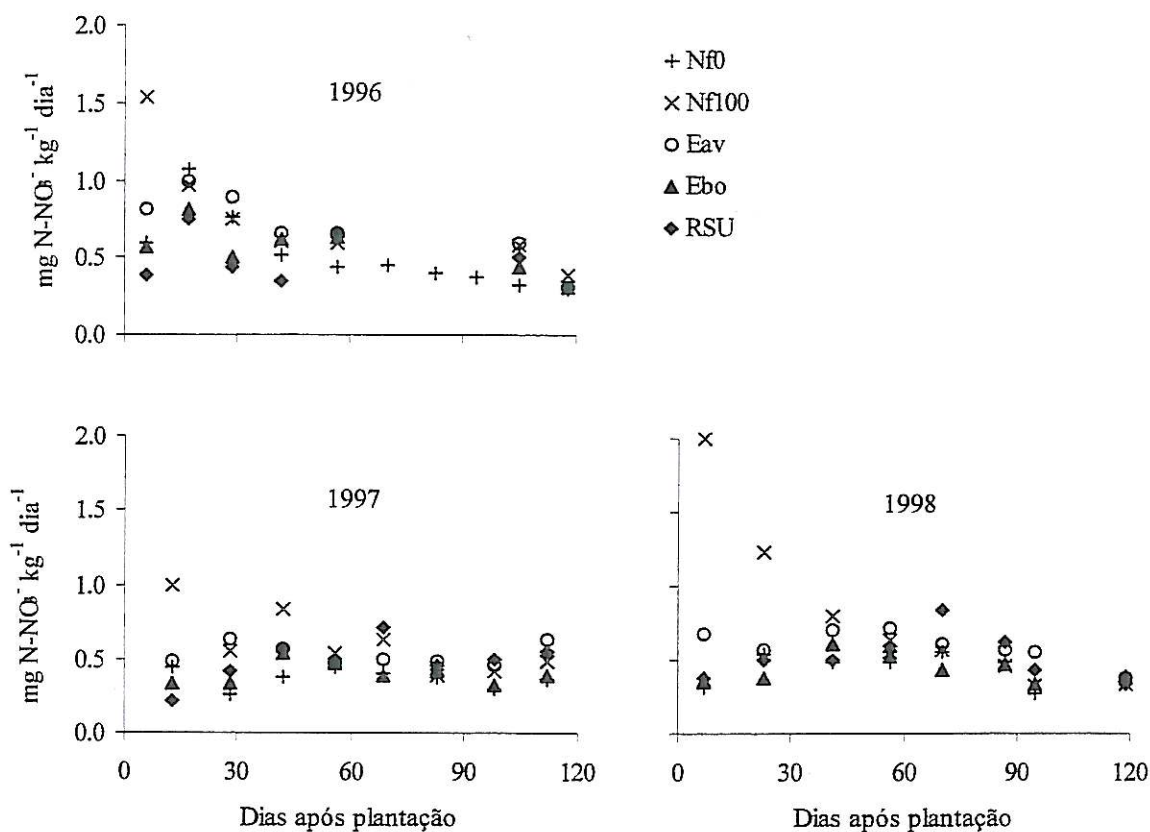


Figura 43 – Taxas de nitrificação durante a estação de crescimento

As modalidades constituídas por fertilizantes orgânicos não originaram taxas de amonificação e nitrificação inequivocamente superiores à modalidade testemunha. Diferenças significativas raramente ocorreram (anexos 7.15.18 e 7.15.19). O estrume de aviário foi, contudo, o fertilizante orgânico que globalmente apresentou taxas médias de amonificação

mais negativas e nitrificação mais positivas. O efeito foi, sobretudo, visível nas primeiras datas de amostragem (figuras 42 e 43). Também não foi evidente o aumento das taxas de nitrificação nas fases finais do ciclo nas modalidades fertilizadas com correctivos orgânicos. Contudo, o resultado da testemunha foi significativamente inferior aos restantes tratamentos entre 49 e 64 DAP em 1996 e inferior ao RSU em 62 e 76 DAP em 1997 (anexo 7.15.19).

Excluída a modalidade fertilizada com ureia, as taxas de nitrificação oscilaram entre 0,22 a 1,1 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ dia⁻¹, com um valor médio próximo de 0,5 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ dia⁻¹. A comparação de taxas de mineralização entre investigadores não faz muito sentido, devido à variabilidade de condições ambientais e culturais encontradas, apesar de ser um tipo de informação frequente na bibliografia (Hatch *et al.*, 1990; Rees *et al.*, 1994; Vinther, 1994; Fisk e Schmidt, 1995; Trindade, 1997). Os valores variaram pouco ao longo da estação de crescimento devido à ausência de fluxos de humedecimento e secagem e à reduzida variação na temperatura. Entre anos, também não foram detectadas diferenças apreciáveis. Apenas nas primeiras datas de 1996 as taxas de nitrificação parecem ser ligeiramente mais elevadas. Este resultado denota a estabilidade do sistema cultural, no qual não foram registadas mudanças significativas na sequência de culturas.

4.6.2.3 – Acumulação líquida de azoto mineral

Na figura 44 apresentam-se os resultados da acumulação líquida de N-NH₄⁺ durante a estação de crescimento. A variação do N-NH₄⁺ acumulado reflecte as taxas de amonificação líquida negativas (figura 42). Durante o ciclo, o azoto amonificado foi quantitativamente inferior ao N-NH₄⁺ que foi imobilizado, nitrificado ou absorvido.

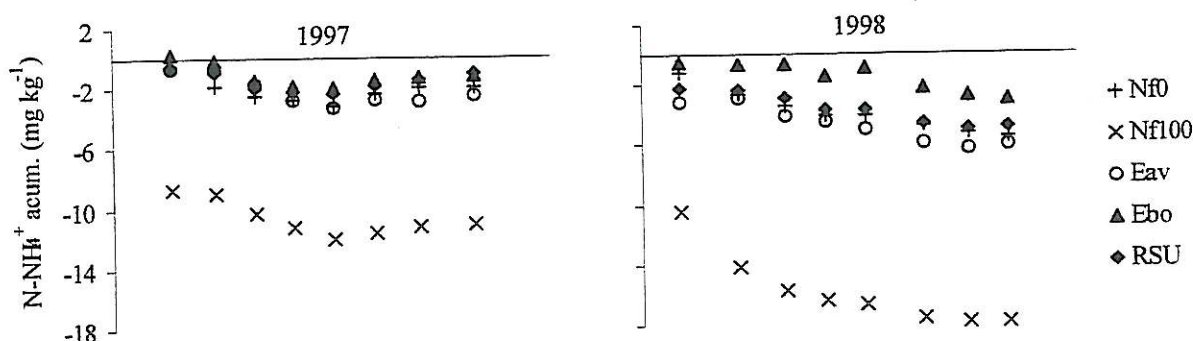


Figura 44 – Acumulação de N-NH₄⁺ durante e estação de crescimento

Nas modalidades com ureia, a amonificação líquida foi particularmente negativa dada a grande quantidade de N-NH_4^+ já formado no início das incubações. As diferenças entre 1997 e 1998 centram-se no primeiro período de incubação. Em 1997, o decréscimo do primeiro para o segundo período de incubação não é tão acentuado como em 1998, já que, no início do primeiro período de incubação, grande parte do azoto resultante da ureia estaria nitrificado, devido ao atraso no início das incubações.

Entre as modalidades constituídas por fertilizantes orgânicos e a testemunha não ocorreram diferenças significativas (anexo 7.15.20). Contudo, em 1998, o estrume de aviário registou, de forma consistente, os valores mais negativos da amonificação líquida, enquanto o estrume de bovino registou os valores menos negativos.

A quantidade de N-NO_3^- acumulado durante o ciclo fornece informação sobre a quantidade de azoto disponibilizado para as plantas. O ião nitrato é a forma azotada que se acumula neste solo, ficando disponível para ser absorvido. O ião amónio, aos níveis que se encontra nestes solos, será usado, predominantemente, pelos microrganismos no processo de imobilização biológica e nitrificação.

Durante a estação de crescimento, as modalidades fertilizadas com ureia acumularam 80,1, 68,4 e 98,8 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. A ureia apresentou diferenças evidentes entre anos de ensaio. Em 1998, ocorreu um afastamento claro relativamente às restantes modalidades, logo a partir do primeiro período de incubação (figura 45). A justificação parece centrar-se no facto de, em 1996 e 1997, parte da ureia não ter sido hidrolisada nos catorze centímetros superficiais. Este resultado pode identificar uma limitação da metodologia em ser utilizada em modalidades com fertilizantes de síntese, designadamente se os nutrientes se apresentarem em combinações químicas de grande dinâmica no solo. É preciso ter também em conta que, em 1997, o período total de incubação teve menos uma semana, devido ao atraso inicial e à menor duração da estação de crescimento. As incubações terminaram em 125, 124 e 126 DAP em 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

Nas modalidades com estrume de aviário foram acumulados 75,8, 59,5 e 74,9 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ nos três anos de ensaio consecutivos. Estes valores foram os mais elevados entre fertilizantes orgânicos. Contudo, apenas em 1996 as diferenças para os restantes tratamentos com orgânicos e para a testemunha foram significativas. Neste ano, o fertilizante utilizado apresentava uma razão C/N particularmente baixa (4,7) e teores em azoto mineral (1,4 g kg^{-1}) e azoto total (39,9 g kg^{-1}) muito altos. Toda a informação disponível da produção, azoto exportado e indicadores do estado nutritivo suportam este resultado.

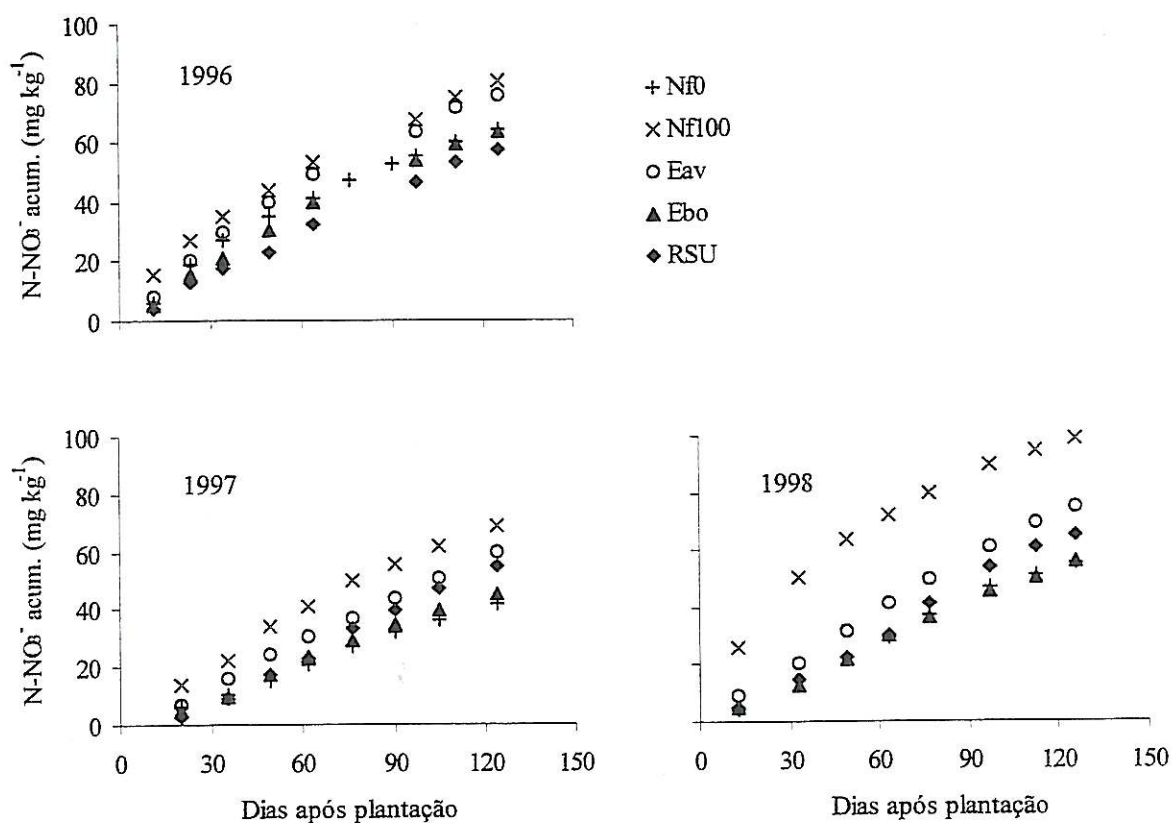


Figura 45 – Acumulação de N-NO_3^- durante a estação de crescimento

Nas modalidades com RSU foram acumulados 57,6, 54,7 e 65,3 $\text{mg N-NO}_3^- \text{kg}^{-1}$. Em 1996 parece ter ocorrido imobilização líquida, na medida em que o resultado foi estatisticamente inferior à modalidade testemunha (anexo 7.15.21). Em 1997 e 1998, o RSU esteve associado a um mau resultado inicial, recuperando gradualmente ao longo da estação de crescimento. Nesses dois anos, o estrume de bovino apresentou o pior resultado entre fertilizantes orgânicos. A acumulação de nitratos foi de 63,7, 45,1 e 56,1 $\text{mg N-NO}_3^- \text{kg}^{-1}$ em 1996, 1997 e 1998, respectivamente. A composição química destes fertilizantes, designadamente razão C/N, azoto mineral ou azoto total (anexo 7.5) não permitem justificar as diferenças. Outros factores, eventualmente relacionados com o processo de compostagem, podem ter condicionado os resultados.

Nas modalidades testemunha foram acumulados 64,1, 41,5 e 55,4 $\text{mg N-NO}_3^- \text{kg}^{-1}$ para a sequência de anos em ensaio. Os valores médios na modalidade testemunha de 1996 são bastante superiores aos de 1997 e 1998 e os de 1998 superiores aos de 1997. Os resultados da produção, azoto exportado e indicadores do estado nutritivo tinham fornecido já informação de que poderia ser esta a ordem da disponibilidade natural de azoto no solo nos três anos de ensaio.

4.6.2.4 – Relação entre o azoto acumulado na incubação *in situ* e exportado pelos tubérculos

Na figura 46a apresenta-se a relação entre o azoto mineralizado e acumulado na forma nítrica durante a estação de crescimento e o azoto exportado pelos tubérculos. A análise de variância da regressão permitiu identificar uma relação linear altamente significativa ($p = 0,001$), com um coeficiente de determinação de 0,59.

O resultado obtido valida esta técnica de incubação como um método de campo capaz de fornecer informação sobre a disponibilidade biológica de azoto durante a estação de crescimento. Contudo, excluindo as modalidades com ureia, o coeficiente de determinação passa para 0,67 (figura 46b). Esta melhoria na qualidade do ajustamento poderá ser devida ao facto de parte da ureia se ter afastado da camada superficial antes da sua completa amonificação, não sendo contabilizada no azoto mineral acumulado. Este aspecto foi já identificado como uma limitação da metodologia, quando se utilizarem fertilizantes cujos nutrientes possam apresentar uma grande mobilidade no solo.

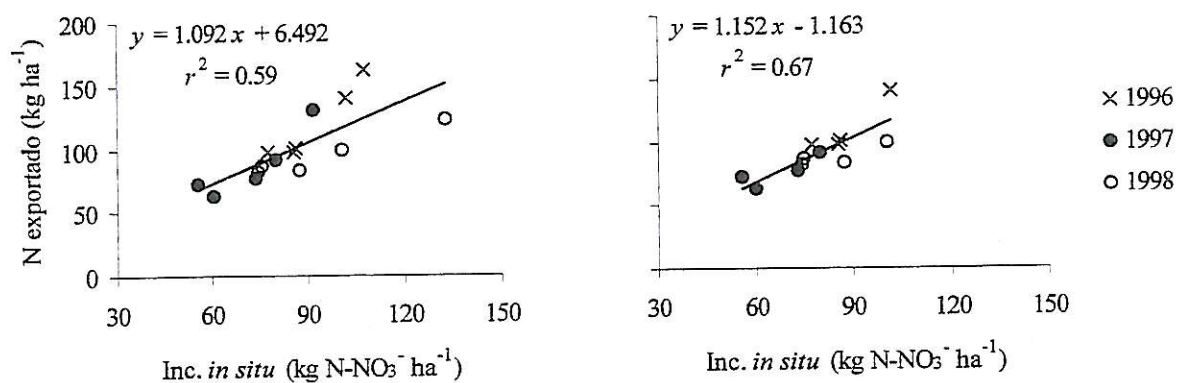


Figura 46 – Relação entre o N-NO₃⁻ mineralizado no ensaio de incubação *in situ* e o N exportado (a) incluindo todas as modalidades ensaiadas e (b) sem a modalidade com ureia.

4.6.2.5 – Balanço de azoto no solo

Para avaliar a disponibilidade natural de azoto no solo é preciso conhecer o contributo das camadas abaixo dos 14 cm superficiais. A metodologia utilizada baseou-se no estabelecimento do balanço do azoto no solo. Considerou-se o azoto introduzido na água e nas

sementes, o azoto absorvido e a variação de azoto mineral no solo no início e fim da estação de crescimento considerando uma profundidade de 60 cm.

A equação do balanço do azoto teve, por base, as modalidades testemunha, nas quais os fluxos não determinados como a lixiviação e a volatilização terão tido um significado diminuto ou mesmo nulo. A equação é apresentada na forma:

$$N \text{ absorvido} = N \text{ mineralizado (0-14 cm)} + N \text{ mineralizado (14-30 cm)} + N \text{ na água} + N \text{ na semente} + (N \text{ inicial} - N \text{ final})_{0-60 \text{ cm}},$$

sendo os componentes da equação e os resultados expressos em kg N ha^{-1} .

O azoto absorvido foi estimado aplicando um factor de eficiência fisiológica sobre o azoto exportado. Admitiu-se que o azoto exportado representa 85 % do azoto absorvido. Este valor surge com base dos resultados de Rodrigues (1995) e traduz a diferença entre a quantidade de azoto registada na totalidade da planta no momento do ciclo de máxima acumulação e o azoto exportado nos tubérculos na colheita. Os restantes 15 % considera-se ser azoto que não migrou para os tubérculos por permanecer na rama, nas raízes ou ter sido volatilizado a partir da canópia durante a senescência. Considerou-se, ainda, um acréscimo de 10 % sobre o azoto exportado, devido ao calibre refugo não ter sido considerado no valor da exportação. O azoto dos tubérculos/semente foi calculado com base no peso médio dos tubérculos e do seu teor em azoto. O azoto introduzido pela água (rega + precipitação) foi obtido a partir do quadro 2 (página 132). Pela equação do balanço determina-se o azoto mineralizado abaixo dos 14 cm, para os três anos consecutivos de ensaio, com os dados:

$$101,07 \times 1,1/0,85 = 86,22 + N \text{ mineralizado (14-30 cm)} + 5,62 + 5 + (20,91 - 2,53);$$

$$72,21 \times 1,1/0,85 = 55,78 + N \text{ mineralizado (14-30 cm)} + 8,56 + 8 + (22,36 - 8,99);$$

$$81,74 \times 1,1/0,55 = 74,53 + N \text{ mineralizado (14-30 cm)} + 6,21 + 8 + (26,04 - 19,76).$$

Obtiveram-se valores para o azoto mineralizado na camada 14-30 cm de 15,5, 7,7 e 10,8 kg N ha^{-1} para 1996, 1997 e 1998, respectivamente. Relativamente à totalidade de azoto mineralizado (0-30 cm), representa 15, 12 e 13 %, respectivamente. O resultado permite concluir que as transformações do azoto foram substancialmente mais importantes na camada superficial, mais arejada. A actividade biológica associada à matéria orgânica colocada a maior profundidade parece ter sido mínima. Assim, 14 cm parece ser uma profundidade adequada para estudar as transformações do azoto com influência na disponibilidade do nutriente para as plantas.

4.6.3 – Incubações laboratoriais

4.6.3.1 – Incubação biológica aeróbia

O azoto mineralizado durante a incubação biológica aeróbia apresentou-se bem correlacionado com o azoto exportado pelos tubérculos (figura 47 a). As correlações são ligeiramente melhores utilizando os resultados directos, relativamente à variante em que se extraiu o azoto mineral presente no início do período de incubação, e cujo coeficiente de determinação foi de 0,73 (anexo 7.17). O resultado sugere que o azoto mineral no solo no início da estação de crescimento terá ficado totalmente disponível para as plantas, tendo, por isso, elevado valor residual.

A correlação dos resultados dos métodos de incubação aeróbia e incubação *in situ* foi, também, significativa, embora com coeficiente de determinação inferior (figura 47 b).

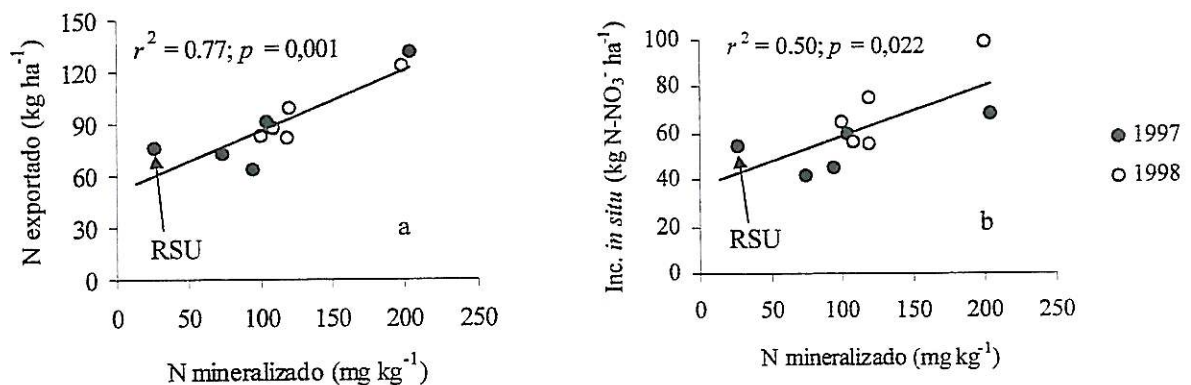


Figura 47 – Relação entre o azoto mineralizado na incubação aeróbia com (a) o azoto exportado pela cultura e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

Atendendo à simplicidade da incubação e à correlação elevada com o azoto exportado pelos tubérculos, este método parece ser adequado para triar testes químicos laboratoriais utilizáveis em rotina.

Apesar da boa relação geral do método de incubação aeróbia com o azoto exportado, merece a pena destacar o comportamento do RSU de 1997. A quantidade de azoto mineralizado na incubação foi particularmente baixa (26,96 mg kg⁻¹), embora esse aspecto não se tivesse reflectido no azoto exportado nem no azoto mineralizado no ensaio de incubação *in situ*. Contudo, já havia indicação (4.6.2.3) de que, inicialmente, o RSU disponibilizava pouco azoto, melhorando o seu comportamento ao longo do ciclo. Em 1998, a

quantidade de azoto mineralizado na modalidade com RSU foi, também, inferior à da modalidade testemunha, mas os valores estiveram mais próximos. Os resultados podem ser devidos à imobilização biológica ou a efeitos iniciais adversos sobre a população microbiana que mineraliza a matéria orgânica. Aceitando a segunda justificação, o efeito inibidor poderia dever-se a uma compostagem deficiente do material, eventualmente por ter decorrido em condições de anaerobiose. As explicações não invalidam o bom desempenho final do RSU. Quer a imobilização biológica, quer a eventual presença de substâncias nocivas à população microbiana podem ser fenómenos temporários, que terão desaparecido ao longo da estação de crescimento.

4.6.3.2 – Incubação biológica anaeróbia

A destilação dos extractos foi a variante do método de incubação anaeróbia cujos resultados se apresentaram melhor correlacionados com o azoto exportado (figura 48 a). A tentativa de aplicar o modelo linear aos resultados da incubação anaeróbia e da incubação *in situ* originou parâmetros de ajustamento menos satisfatórios (figura 48 b). A maior dificuldade em estabelecer relações lineares significativas entre o azoto mineralizado nas incubações laboratoriais e na incubação *in situ*, relativamente ao azoto exportado pelos tubérculos, pode dever-se ao facto de na incubação *in situ* poderem ser geradas subestimativas do azoto mineralizado nas modalidades com ureia, devido à migração da molécula em profundidade antes de ser hidrolisada, como foi referido em 4.6.2.4.

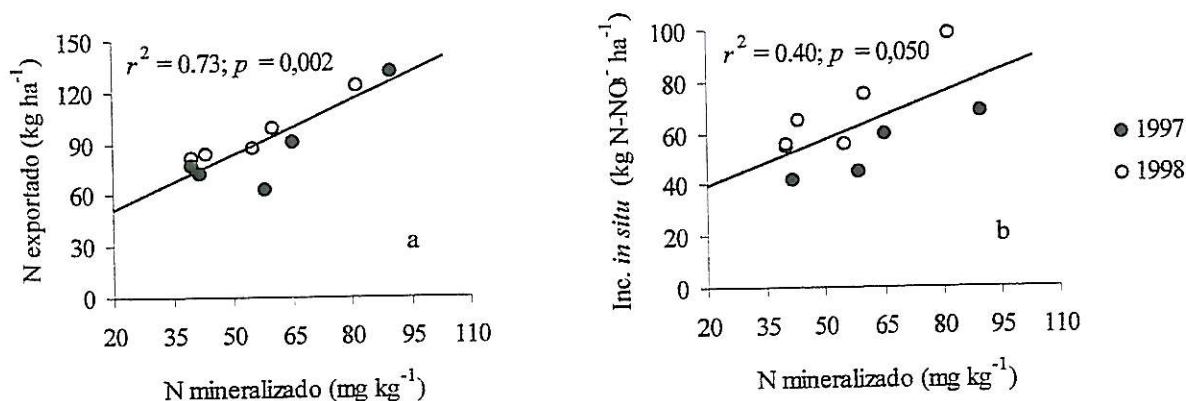


Figura 48 – Relação entre os resultados da incubação anaeróbia (destilação do extracto) com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

A qualidade do ajustamento com o azoto exportado foi, apenas, ligeiramente inferior à do método de incubação aeróbia, podendo também ser considerado um método adequado para

obter informação, ainda mais rápida, sobre a disponibilidade biológica do solo e triar testes químicos adaptáveis em rotina.

A destilação directa da mistura solo/solução remove muito maiores quantidades de azoto, provavelmente pela hidrólise de substâncias orgânicas durante a destilação, devido à elevação do pH pelo MgO (Bremner e Shaw, 1955; Robinson, 1968; Stanford e DeMar, 1970). Contudo, a julgar pela correlação com o azoto exportado pela cultura ($r^2 = 0,54$), inferior à variante da destilação do extracto, esse azoto terá reduzido significado biológico.

A subtracção do azoto destilado pelo procedimento de referência (KCl a frio) também não favoreceu a correlação. Nesta variante, a probabilidade associada à análise de variância da regressão identificou um ajustamento linear significativo, mas com coeficiente de determinação de 0,48 (anexo 7.17), inferior ao de qualquer das outras variantes do método anteriormente referidas.

4.6.3.3 – Incubação aeróbia vs incubação anaeróbia

Na figura 49 apresenta-se a relação entre os resultados da incubação anaeróbia (destilação do extracto) e da incubação aeróbia (sem exclusão do azoto mineral inicial). Neste caso, obteve-se uma relação linear altamente significativa ($p = 0,001$), com um coeficiente de determinação de 0,74.

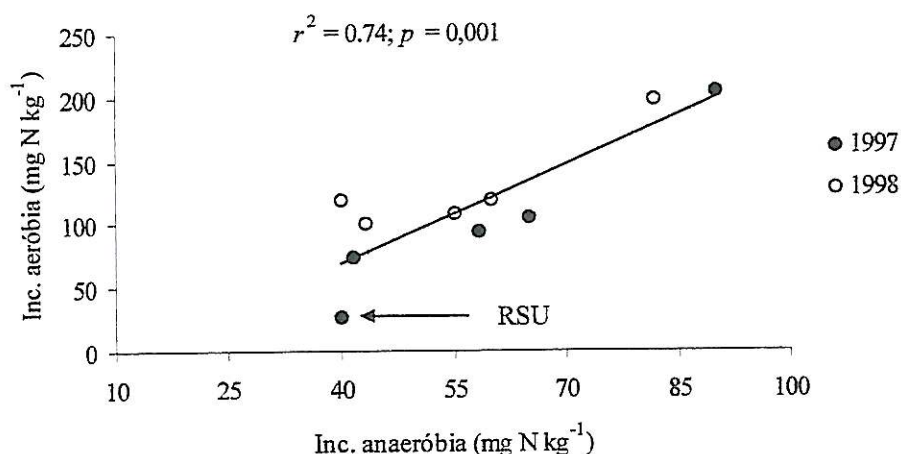


Figura 49 – Relação entre os resultados da incubação anaeróbia (destilação do extracto) e incubação aeróbia (sem exclusão do N mineral inicial).

Os resultados de 1997 posicionam-se maioritariamente abaixo do recta de ajustamento, enquanto os de 1998 se posicionam na parte superior. Este aspecto significa que os resultados

da incubação aeróbia de 1997 foram inferiores aos de 1998 para o mesmo tratamento fertilizante. Pelo contrário, os valores da azoto mineralizado na incubação anaeróbia em 1997 são ligeiramente superiores aos de 1998 (anexo 7.14). A informação obtida com a produção, azoto exportado e indicadores do estado nutritivo deu indicação de que a disponibilidade natural de azoto no solo em 1997 foi inferior. Assim, o método de incubação aeróbia parece estar em melhor sintonia com os métodos biológicos de campo. O resultado anterior e o facto da incubação aeróbia ter mineralizado praticamente o dobro do azoto, comparativamente com a incubação anaeróbia, sugerem que, apesar da correlação razoável entre os dois métodos, parte do azoto mineralizado terá origem em fracções diferentes da matéria orgânica.

A quantidade de azoto mineralizada do RSU de 1997 pela incubação aeróbia foi particularmente baixa (figura 49). Este aspecto demonstra, também, que os resultados da incubação aeróbia estão em melhor sintonia com os resultados de campo, já que o fenómeno foi registado nas primeiras fases da incubação *in situ* (4.6.2.3), tendo sido atribuído a imobilização biológica ou a um qualquer efeito inibidor sobre a população microbiana.

4.6.3.4 – Incubação aeróbia com membranas de troca

No método original de Qian e Schoenau (1995), o azoto mineralizado é subtraído do azoto nítrico inicial. Os nitratos iniciais são extraídos com uma hora de enterramento das membranas. A relação entre os resultados das duas variantes, com e sem extracção dos nitratos iniciais, ajustou-se a uma recta ($r^2 = 1,00$) (anexo 7.17). A quantidade de nitratos extraída com uma hora de enterramento da tira foi idêntica em todos os tratamentos (anexo 7.14). Assim, os resultados sugerem que uma hora pode ser insuficiente para haver difusão significativa de iões, devido ao gradiente na sua concentração que se gera à medida que vão sendo retidos na membrana. Nestas circunstâncias, será indiferente usar os resultados de uma ou de outra variante.

A relação entre os resultados do método de incubação com membranas de troca e o azoto exportado pela cultura não foi significativa, quando se pretendeu ajustar o modelo linear (figura 50 a). Resultado idêntico foi obtido com o método de incubação *in situ* (figura 50 b). A qualidade do resultado ficou bastante aquém da que foi obtida pelos proponentes do método. Qian e Schoenau (1995) estabeleceram relações lineares significativas com o azoto exportado pela *Brassica napus* e com valores de r^2 entre 0,86 e 0,57.

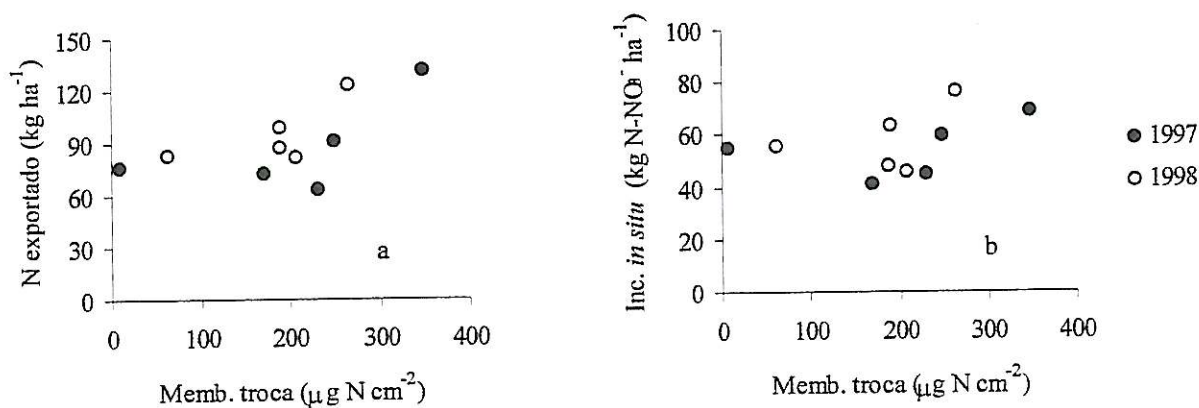


Figura 50 – Relação entre a quantidade de ião nitrato adsorvido nas membranas com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

A correlação dos resultados do método de incubação aeróbia com areia e do método que recorre às membranas de troca foi significativa ($p = 0,005$) e o coeficiente de determinação de 0,66 (figura 51 a). A relação entre os resultados da incubação com membranas e da incubação anaeróbia apresentou parâmetros de ajustamento ao modelo linear idênticos (figura 51 b).

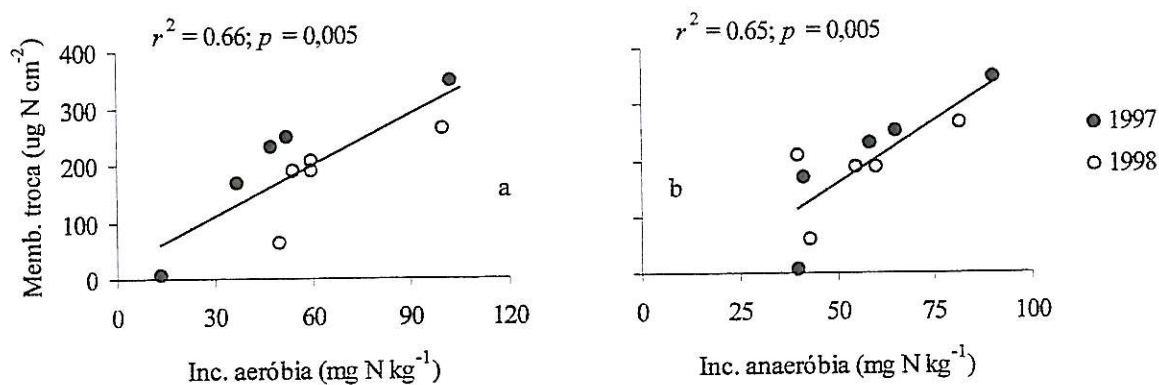


Figura 51 – Relação entre os resultados das incubações (a) aeróbia com areia e (b) anaeróbia com a incubação com membranas.

Apesar da relação linear com o método de incubação aeróbia ser significativa, o resultado tem de ser considerado bastante modesto, dada a proximidade entre as duas metodologias. A origem da variabilidade poderá ser procurada na funcionalidade do processo de enterramento das membranas. É possível que os iões nitrato adsorvidos na membrana, no fim do período de incubação, sejam subestimativas do azoto mineralizado e nitrificado, já que o movimento dos iões se faz apenas por difusão, devido ao gradiente de concentração gerado. Quando as membranas são utilizadas como um processo normal de extracção de iões (Qian *et al.*, 1992; Pare *et al.*, 1995), preparam-se suspensões de solo e, uma vez inseridas as

membranas, segue-se um período de agitação que facilita as trocas iónicas. Com este tipo de incubação é, também, difícil assegurar um bom equilíbrio entre o teor de humidade e de ar que garanta elevadas taxas de mineralização sem que ocorra desnitrificação.

4.6.4 – Métodos de extracção química

4.6.4.1 – Azoto total

A determinação do azoto total das misturas solo/fertilizantes não permitiu identificar a disponibilidade de azoto dos diferentes correctivos orgânicos. A correlação com o azoto exportado não foi estatisticamente significativa (figura 52 a). Resultado semelhante foi obtido quando se pretendeu estabelecer a sua relação com o azoto mineralizado na incubação *in situ* (figura 52 b). O facto das quantidades de azoto introduzidas como fertilizante terem pouca expressão, comparativamente com o azoto orgânico total do solo, permite justificar o resultado.

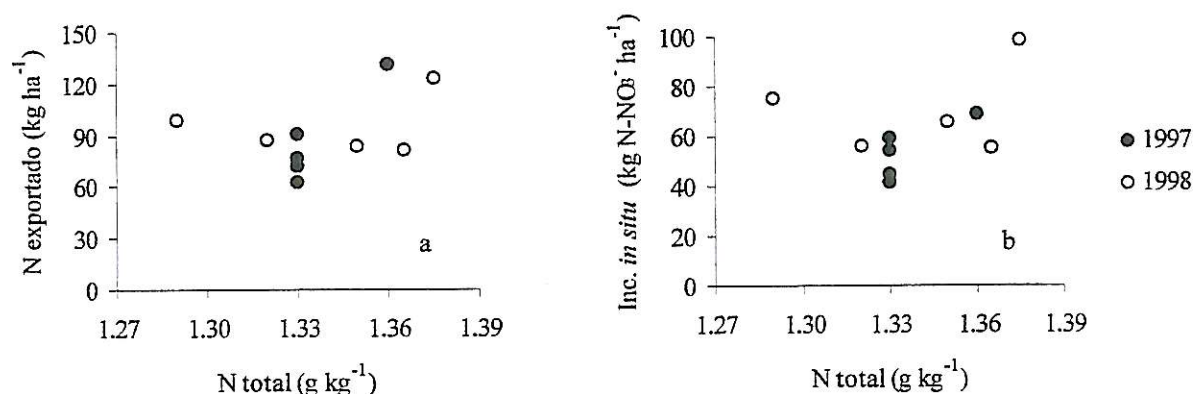


Figura 52 – Relação entre o azoto total com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

4.6.4.2 - Método do autoclave

A relação entre o azoto hidrolisado pelo método do autoclave (variante sem subtracção do azoto inorgânico inicial) e o azoto exportado pela cultura pôde ser ajustado a uma recta (figura 53 a). A análise de variância da regressão identificou uma relação linear significativa com um coeficiente de determinação de 0,51. Contudo, a distribuição das observações merece uma análise mais pormenorizada. Na figura 53 a, pode observar-se que o autoclave não

detectou a menor disponibilidade de azoto verificado em campo no ano de 1997. Antes pelo contrário, foram registados valores mais elevados que em 1998. Contudo, se a análise de variância de regressão for efectuada isoladamente para cada ano de ensaio, obtêm-se relações altamente significativas com coeficientes de determinação de 0,97 e 0,98 para 1997 e 1998, respectivamente. A relação entre os resultados do autoclave e da incubação *in situ* apresentou parâmetros de ajustamento de qualidade inferior mas no mesmo sentido (figura 53 b). As razões foram já apresentadas em 4.6.3.2.

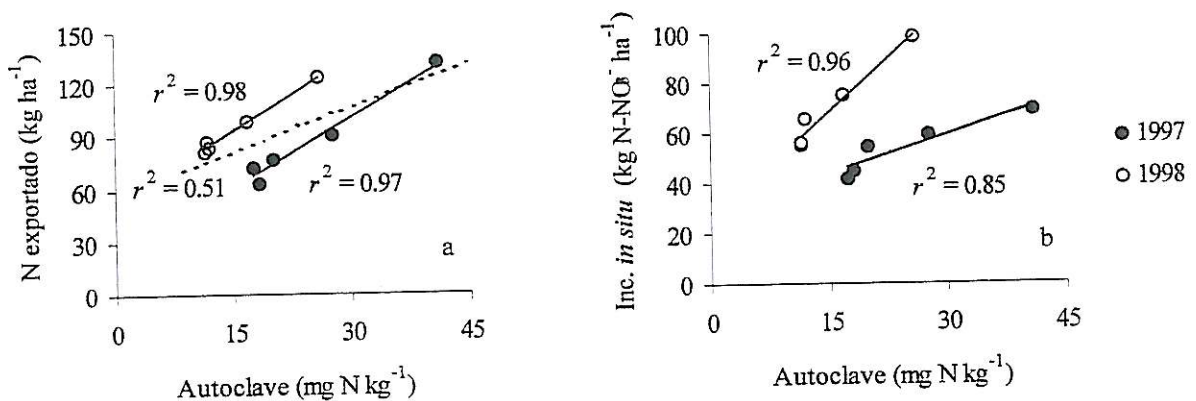


Figura 53 - Relação entre o resultado do método do autoclave com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

Este resultado parece indicar que o método tem fortes potencialidades para discriminar o comportamento dos fertilizantes. Falha, no entanto, quando se introduz variabilidade associada à disponibilidade natural de azoto no solo, aqui traduzida pelo ano de ensaio. O resultado parece, em parte, estar de acordo com o que tem sido obtidos por outros investigadores. A sua utilização para avaliar a disponibilidade de azoto em populações de solos de natureza variada não tem conduzido a resultados satisfatórios (Legg *et al.*, 1971; Gianello e Bremner, 1986 b; Saint-Fort *et al.*, 1990).

4.6.4.3 – Tampão de fosfato/borato

Os resultados das duas variantes do método do tampão de fosfato/borato (TFB) não se correlacionaram, de forma significativa, com nenhum indicador biológico da disponibilidade de azoto (anexo 7.17).

Na figura 54 apresenta-se a sua relação com o azoto exportado pelos tubérculos e mineralizado na incubação *in situ*. Excluindo as modalidades com ureia, obtêm-se

ajustamentos lineares significativos com coeficientes de determinação de 0,56 e 0,47, respectivamente.

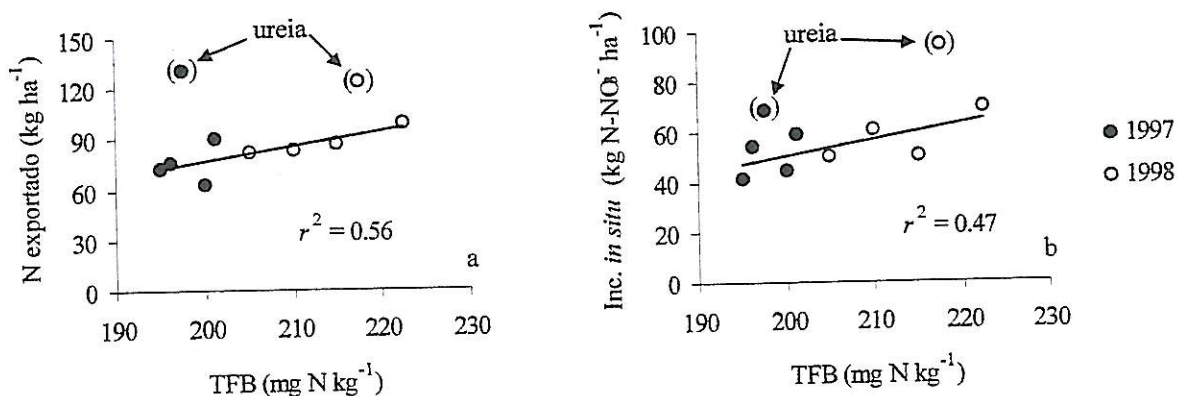


Figura 54 – Relação entre o azoto libertado pelo TFB com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

A ureia parece não ser hidrolisada pela acção desta solução extractiva. Os resultados não invalidam, contudo, a possível capacidade do método em extrair dos correctivos orgânicos azoto com significado biológico. De qualquer forma, não deixa de ser negativo o facto de não incluir a ureia nas formas de azoto facilmente mineralizáveis.

Os solos usados em 1998 libertaram azoto em quantidades superiores aos de 1997. Este resultado está de acordo com a informação obtida com os indicadores biológicos de disponibilidade de azoto e fornece boa indicação do método sobre a sua capacidade em avaliar a disponibilidade natural de azoto no solo.

4.6.4.4 – Solução salina de cloreto de potássio

O método do KCl a quente (sem subtracção do azoto de referência) deu origem a uma relação linear altamente significativa ($p = 0,000$) e com um coeficiente de determinação elevado (0,93) com o azoto exportado pelos tubérculos (figura 55 a). A relação foi, também, altamente significativa com os resultados dos métodos de incubação *in situ* (figura 55 b).

A variante em que se subtrai o azoto destilado com KCl a frio (procedimento de referência), originou correlações altamente significativas com o azoto exportado e mineralizado na incubação *in situ*, mas os coeficientes de determinação foram inferiores ao da variante anterior (anexo 7.17).

O método parece revelar grandes potencialidades para avaliar o comportamento dos estrumes, sobretudo quando se utiliza a variante sem subtração do azoto obtido pelo KCl a frio. A correlação com o azoto exportado foi, inclusive, melhor que a das incubações biológicas. Este resultado pode ser atribuído à menor sensibilidade dos testes químicos aos pré-tratamentos das amostras, tal como referem Keeney e Bremner (1966).

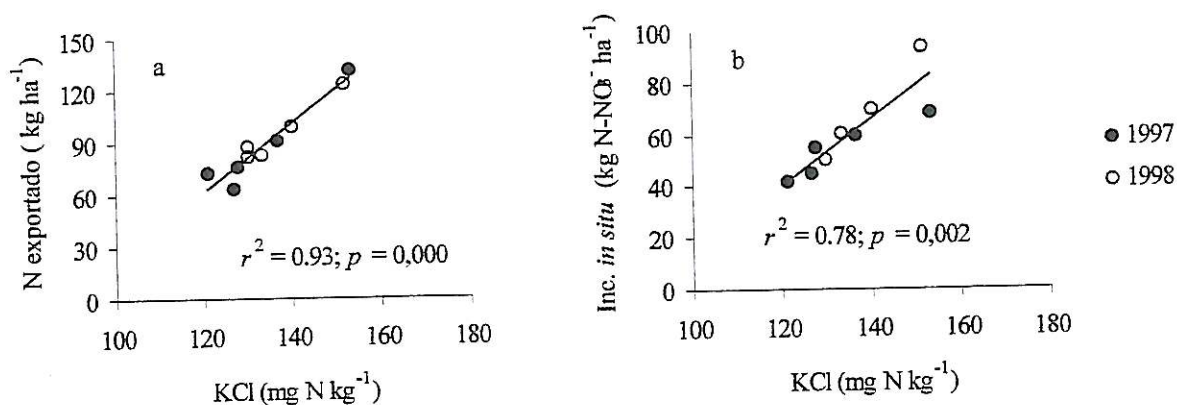


Figura 55 – Relação entre o azoto hidrolisado pelo KCl a quente com (a) o azoto exportado pelos tubérculos e (b) mineralizado na incubação *in situ*.

Quando se utilizam populações de solos de natureza diversificada, o método tem dado, também, bons resultados, sobretudo a variante em que não se subtrai o azoto do procedimento de referência (Jalil *et al.*, 1996; Campbell *et al.*, 1997). Assim, este parece ser um método polivalente, capaz de fornecer informação sobre a disponibilidade de azoto dos solos e dos correctivos orgânicos.

As variantes sem subtração do azoto mineral inicial originaram sempre melhores resultados, quer se tratasse de métodos biológicos ou de extracção química. Desta forma, estas variantes parecem ser duplamente vantajosas já que, para além dos melhores resultados estatísticos, dispensam parte dos procedimentos analíticos.

5 - Conclusões

5.1 – Produção e qualidade dos tubérculos

A utilização de doses crescentes de azoto originou uma resposta em patamar, no qual a produção de tubérculos não decresceu, mesmo quando foi usado nutriente em quantidades manifestamente excessivas. A resposta em patamar, associada ao reduzido significado do preço da unidade de azoto relativamente ao valor da produção, foram confirmados como sendo dos factores que potencialmente mais podem contribuir para se exagerarem as doses a aplicar.

A temperatura excessiva nos meses de Verão foi dos principais factores a limitar o potencial produtivo da cultura. De qualquer forma, atendendo às produtividades conseguidas, parece aceitável recomendar que a produção esperada para a região se possa definir até 50 Mg ha⁻¹.

A dose de azoto que maximizou a produção de tubérculos foi superior à dose que maximizou a percentagem de matéria seca dos tubérculos. Este resultado parece indicar que será impossível definir, como objectivo para a cultura, a maximização, em simultâneo, da produção e da percentagem de matéria seca nos tubérculos.

O teor de nitratos nos tubérculos aumentou, de forma linear, com o azoto aplicado como fertilizante. Os valores atingidos foram pouco importantes quando comparados com os resultados obtidos por outros investigadores e insignificantes quando comparados com os resultados publicados para outras espécies vegetais.

Não foi encontrada qualquer relação entre a fertilização azotada e diversos outros parâmetros da qualidade dos tubérculos, como o número de tubérculos abrolhados, recrescidos ou esverdeados. Também não foi encontrada qualquer relação entre a fertilização azotada e a incidência de sarna vulgar, apesar do elevado grau de infecção dos tubérculos.

5.2 – Eficiência de uso do azoto

A percentagem de azoto dos fertilizantes recuperado pelos tubérculos decresceu com a dose utilizada. Para fertilizações correspondentes à dose técnica óptima, foi recuperado apenas 40 a 50 % do azoto aplicado. Este valor é manifestamente baixo para uma cultura Primavera/Verão, na qual se controlou a dotação de rega. O resultado será devido a aspectos

específicos desta cultura, como o deficiente desenvolvimento do sistema radicular e a remobilização incompleta do azoto da rama para os tubérculos.

5.3 - Calibração dos aparelhos portáteis RQflex e SPAD-502

Os resultados do reflectómetro portátil estiveram altamente correlacionados ($r^2=1,00$) com a concentração de nitratos numa solução padrão de nitrato de potássio. As correlações obtidas entre os resultados do RQflex e de um método laboratorial de análise sobre extractos de tecidos vegetais foram, também, muito próximas (r^2 entre 0,88 e 0,92). As reduzidas diferenças foram atribuídas, maioritariamente, ao processo de preparação dos extractos para análise. Assim, do ponto de vista analítico, os resultados do aparelho parecem ser bastante aceitáveis.

O SPAD-502 produziu leituras sobre o mesmo folíolo (30 leituras) com coeficientes de variação muito baixos (entre 2,07 e 4,49 %). O resultado deu boa indicação da reprodutibilidade do aparelho e da homogeneidade do meio. Leituras obtidas em folíolos de plantas diferentes dentro da mesma unidade experimental originaram coeficientes de variação ainda muito aceitáveis (entre 6,90 e 9,87 %). O resultado sugere que esta cultura não acrescenta, por si, dificuldades particulares no uso do aparelho.

5.4 – Indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de azoto no solo

Os indicadores nitratos nos pecíolos, azoto total nas folhas e valores SPAD apresentaram um padrão idêntico na resposta ao azoto aplicado. Nas primeiras datas de amostragem, os seus valores foram ajustados por modelos quadráticos, denotando ponto de saturação para doses crescentes de azoto aplicado. Nas últimas datas de amostragem, foram ajustados polinómios de terceiro grau, evidenciando boa sensibilidade à variação de azoto disponível no solo.

Os indicadores do estado nutritivo decresceram ao longo do ciclo nas modalidades de fertilização de fundo sem azoto em cobertura. Contudo, foi possível demonstrar que o decréscimo de nitratos nos pecíolos e de azoto nas folhas está associado à diminuição de azoto disponível no solo. Aplicando azoto em cobertura, foi possível inverter a tendência e aumentar de novo os teores de nitratos e azoto total nos tecidos.

Durante a estação de crescimento, o teor de nitratos nos pecíolos decresceu até valores próximos de zero nas modalidades menos fertilizadas. Este resultado sugere que se trata de uma forma exclusivamente de reserva. O azoto total nas folhas não desceu abaixo de 30 g kg⁻¹, mesmo nas modalidades pouco fertilizadas, sugerindo que uma parte importante do nutriente se encontra em estruturas vitais para a planta. Resultado idêntico foi obtido com os valores SPAD, que traduzem o conteúdo em clorofila nas folhas.

Na primeira data de amostragem (10 DAE), não foi possível obter diferenças estatísticas nas estimativas do teor de clorofila entre modalidades de fertilização. O resultado foi atribuído ao facto das clorofilas serem estruturas prioritárias para o azoto disponível.

Os níveis de azoto inorgânico no solo decresceram de forma linear durante a estação de crescimento, à medida que ia sendo absorvido pelas plantas. Em todas as modalidades se tendia para valores residuais inferiores a 5 mg kg⁻¹. A evolução foi idêntica quando se analisou o teor de nitratos ou o azoto inorgânico (NO₃⁻ + NH₄⁺), dada a pouca expressão quantitativa do NH₄⁺. Os resultados mostraram ainda que a hidrólise da ureia e a posterior nitrificação das formas amoniacais terão sido processos bastante rápidos, dando indicação de que a nutrição azotada das plantas terá sido dominada pela forma nítrica.

5.5 – Níveis críticos e quantificação do azoto a aplicar em cobertura

Foi possível estabelecer níveis críticos para todos os indicadores do estado nutritivo e da disponibilidade de azoto no solo para qualquer fase do ciclo, como suporte da decisão de se efectuarem adubações de cobertura. Ficou ainda demonstrada a importância de se ter em conta a técnica pela qual se determinam os níveis críticos para se compararem os resultados de diferentes investigadores.

Os níveis críticos dos indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade de azoto no solo apresentaram, globalmente, uma percentagem de estimativas erradas entre 8,3 e 12,5 %. Os indicadores da disponibilidade de azoto no solo originaram os melhores resultados, com percentagem média de estimativas erradas de 8,3. Entre os indicadores do estado nutritivo das plantas, o teor de nitratos nos pecíolos (9,0 %) e o azoto total nas folhas (9,2 %) apresentaram uma ligeira superioridade na qualidade do diagnóstico relativamente às estimativas do teor de clorofila. De qualquer forma, os resultados do SPAD-502 foram considerados amplamente satisfatórios, com apenas 12,5 % de estimativas erradas.

A qualidade do diagnóstico não melhorou de forma inequívoca ao longo da estação de crescimento, com qualquer dos indicadores. A qualidade do diagnóstico foi muito satisfatória desde as primeiras fases de desenvolvimento da plantas. Este resultado garante grande margem de manobra na estratégia de fertilização, pois permite proceder, atempadamente, aos ajustamentos de fertilização necessários a partir de fases do ciclo para as quais está garantido um elevado efeito nas plantas pela aplicação do nutriente.

A interpretação dos resultados do SPAD-502 pelos valores relativos também não melhorou a qualidade do diagnóstico. Provavelmente, não foi possível avaliar de forma adequada as potencialidades desta técnica de interpretação de resultados por não estarem em estudo factores ecológicos e culturais que influenciem a intensidade da coloração verde das plantas, para além da fertilização azotada.

O indicador azoto inorgânico no solo também não apresentou vantagens relativamente ao uso isolado do NO_3^- . O resultado foi atribuído ao facto das condições não terem sido favoráveis à permanência do NH_4^+ no solo.

Foi possível quantificar o azoto a aplicar em cobertura com base em cada um dos indicadores do estado nutritivo ou da disponibilidade de azoto no solo. A técnica é válida para qualquer estado fenológico durante a estação de crescimento. A metodologia baseou-se no estabelecimento de relações significativas entre os indicadores do estado nutritivo e a dose óptima aplicada em cobertura.

5.6 – Cultura intercalar

O triticale mostrou grande capacidade em absorver o azoto que gradualmente foi sendo mineralizado durante a Primavera. Os níveis de azoto mineral no solo no fim de Abril foram muito baixos quando comparados com os da situação de solo nu. A eficácia na recuperação do azoto inorgânico residual da cultura da batata foi bastante inferior. No Inverno, a avaliação do estado nutritivo das plantas e, na Primavera, a produção de biomassa e o azoto exportado não evidenciaram as diferenças que tinham sido registadas no azoto inorgânico no solo em Outubro do ano anterior.

Alguma incapacidade do triticale funcionar com eficácia como *catch crop* deve-se ao insuficiente desenvolvimento vegetativo no período Outono/Inverno. O problema pode não ser fácil de resolver. Semear no fim do Verão, como na Europa Central e do Norte, não é viável devido às deficientes condições hídricas impostas pela estação seca, a menos que se

recorra à rega. Como alternativa às gramíneas poderá ter interesse o nabo forrageiro. É uma espécie que apresenta um desenvolvimento vegetativo rápido, originando bastante biomassa no período Outono/Inverno.

Em Abril, os níveis de NH_4^+ no solo foram idênticos quer entre as antigas modalidades de fertilização da cultura da batata quer comparando as situações com triticales e em solo nu. O resultado demonstra que o NH_4^+ é consumido pela acção dos microrganismos. Os mecanismos envolvidos serão a nitrificação e a imobilização biológica.

5.7 – Incubação *in situ*

As taxas de nitrificação na modalidade testemunha situaram-se próximas de $0,5 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Os valores foram idênticos durante toda a estação de crescimento, devido à ausência de fluxos de humedecimento e secagem e à reduzida variação na temperatura. Entre anos também não foram registados diferenças apreciáveis, devido à elevada estabilidade do sistema cultural.

A quantidade de N-NO_3^- acumulado durante o ciclo forneceu informação sobre a quantidade de azoto disponibilizado para as plantas. Foi estabelecida uma relação linear altamente significativa, com coeficiente de determinação de 0,67, entre o azoto mineralizado no ensaio de incubação *in situ* e o azoto exportado pelos tubérculos. O resultado valida esta técnica de incubação como método de campo capaz de fornecer informação detalhada da disponibilidade biológica de azoto para as plantas durante a estação de crescimento.

Pelo balanço do azoto no solo ficou demonstrado que abaixo dos 14 cm superficiais a mineralização teve pouco significado. As transformações do azoto mais importantes ocorreram à superfície, na camada melhor arejada. Este resultado confirma que a profundidade amostrada assegura a melhor qualidade nos resultados.

5.8 – Incubações laboratoriais

Foram encontradas relações lineares altamente significativas entre os resultados das incubações biológicas aeróbia e anaeróbia (destilação do extracto) e o azoto exportado. Ambos os métodos se mostraram adequados para seleccionar testes químicos a utilizar em rotina nos laboratórios, dada a qualidade dos resultados e a simplicidade dos métodos.

Contudo, foi denotada uma maior sintonia entre os resultados da incubação aeróbia e o azoto exportado pelos tubérculos relativamente à incubação anaeróbia.

Com a utilização das membranas de troca aniónica, não foi possível estabelecer relações significativas com o azoto exportado. A relação com os resultados da incubação aeróbia com areia também foi considerada insatisfatória. Na justificação do resultado suspeitou-se da possibilidade da troca de iões entre a solução do solo e a membrana não ser suficiente rápida, dado o movimento de iões se restringir ao processo de difusão.

5.9 – Métodos de extracção química

O azoto total, determinado nas misturas solo/fertilizante, não se mostrou correlacionado com o azoto exportado pelos tubérculos, nem com qualquer outro método biológico de estimar a disponibilidade de azoto.

O método do autoclave demonstrou potencialidades para prever o comportamento dos estrumes, se o seu efeito for isolado da disponibilidade natural de azoto no solo. A possibilidade de se dar utilização prática a esta informação é questionável, já que o método teria de ser aplicado paralelamente com outro que fornecesse informação sobre a disponibilidade natural de azoto no solo.

Com a utilização do tampão fosfato/borato foi necessário excluir as modalidades com ureia para se obter uma relação linear significativa com o azoto exportado pelos tubérculos. O método parece não interpretar a ureia como uma forma de azoto facilmente mineralizável. Contudo, forneceu boas indicações sobre a capacidade do tampão fosfato/borato em avaliar a disponibilidade natural de azoto no solo.

O método do KCl a quente deu indicação de ser aquele com maiores potencialidades para avaliar, simultaneamente, a disponibilidade de azoto dos solos e dos fertilizantes orgânicos, sobretudo se for utilizada a variante em que não se subtrai o azoto extraído pelo KCl a frio.

5.10 – Utilização dos correctivos orgânicos

O comportamento bastante modesto dos estrumes na produção de tubérculos evidencia a reduzida quantidade de azoto que libertaram e a ausência de um efeito favorável quantificável pela melhoria das condições físicas e biológicas dos solos. O facto do estrume de aviário

(maior teor em N mineral e facilmente mineralizável) ter originado os melhores resultados sugere que algum efeito positivo dos estrumes deve ser atribuído à libertação de azoto.

Os tubérculos recuperaram apenas 25 % do azoto do estrume de aviário. Nas modalidades fertilizadas com estrume de bovino e RSU, as plantas não recuperaram mais azoto que nas modalidades testemunha. Os indicadores do estado nutritivo das plantas e os resultados dos métodos de incubação *in situ* confirmaram as indicações obtidas com a produção de tubérculos e com o azoto exportado, relativamente à reduzida disponibilidade de azoto dos correctivos orgânicos.

Não foi possível registar acréscimos de disponibilidade de azoto nas modalidades estrumadas a médio e longo prazo. A avaliação do estado nutritivo das plantas em fases avançadas do ciclo não deu indicação de que mais azoto terá ficado disponível pela mineralização progressiva das formas orgânicas dos estrumes. A análise do azoto inorgânico no solo no fim da estação de crescimento (Outubro) e em Abril do ano seguinte, bem como a avaliação do estado nutritivo azotado da cultura intercalar, também não permitiram registar acréscimos da disponibilidade de azoto nas modalidades estrumadas.

O azoto mineralizado a partir do RSU de 1997 na incubação biológica aeróbia de curta duração foi particularmente baixo. Em campo, pela incubação *in situ*, foram registados valores baixos de acumulação de nitratos durante as primeiras fases do ciclo. Contudo, nas fases finais, a modalidade com RSU recuperou e terminou a estação de crescimento com mais azoto mineralizado que o estrume de bovino. Este resultado foi atribuído a imobilização biológica temporária ou a um hipotético efeito inibidor sobre a população microbiana. Aceitando a segunda hipótese, esse efeito poderia dever-se a condições de compostagem deficientes, eventualmente em condições de anaerobiose.

6 – Bibliografia

- Adams, M. A. and P. M. Attiwill. 1986. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forests of south-eastern Australia. II. Indices of nitrogen mineralization. *Plant Soil* 92: 341-362.
- Alberts, E. E., R. E. Burwell and G. E. Schuman. 1977. Soil nitrate-nitrogen determining by coring and solution extraction techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 90-92.
- Aleksic, Z., H. Broeshart and V. Middelboe. 1968. The effect of nitrogen fertilization on the release of soil nitrogen. *Plant Soil* XXIX (3): 474-478.
- Allen, A. L., F. J. Stevenson and L. T. Kurtz. 1973. Chemical distribution of residual fertilizer nitrogen in soil as revealed by nitrogen-15 studies. *J. Environ. Qual.* 2 (1): 120-124.
- Allen, E. J. and R. K. Scott. 1980. An analysis of growth of the potato crop. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 94: 583-606.
- Allison, F. E. 1955. The enigma of soil nitrogen balance. *Adv. Agron.* VII: 213-250.
- Allison, F. E. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Adv. Agron.* 18: 219-258.
- Allison, M. F., M. J. Armstrong, K. W. Jaggard and A. D. Todd. 1998. Integration of nitrate cover crop into sugarbeet (*Beta vulgaris*) rotations. I. Management and effectiveness of nitrate cover crops. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 130: 53-60.
- Almeida, D. P. F. 1995. Análise de crescimento na cultura de batata para indústria. Efeito das cultivares e da adubação azotada. Dissertação do Curso de Mestrado em Horticultura, Fruticultura e Viticultura, UTAD, Vila Real, 167 p.
- Amberger, A. 1993. Efficient management of nitrogen fertilization in modern cropping systems. p. 619-622. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Amer, F. M. and W. V. Bartholomew. 1951. Influence of oxygen concentration in soil air on nitrification. *Soil Sci.* 71: 215-219.
- Appel, T. and K. Mengel. 1990. Importance of organic nitrogen fractions in sandy soils, obtained by electro-ultrafiltration or CaCl₂ extraction, for nitrogen mineralization and nitrogen uptake of rape. *Biol. Fertil. Soils* 10: 97-101.
- Appel, T. and K. Mengel. 1992. Nitrogen uptake of cereals grown on a sandy soils as related to nitrogen fertilizer application and soil nitrogen fractions obtained by electro-ultrafiltration (EUF) and CaCl₂ extraction. *Eur. J. Agron.* 1 (1): 1-9.
- Aronsson, H. and G. Torstensson. 1998. Measured and simulated availability and leaching of nitrogen associated with frequent use of catch crops. *Soil Use Manag.* 14: 6-13.
- Asfary, A. F., A. Wild and P. M. Harris. 1983. Growth, mineral nutrition and water use by potato crops. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 100: 87-101.
- ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1991. Case studies in environmental medicine. Nitrate/nitrite toxicity. *ATSDR*, 16: 1-23.
- Aufhammer, W., and F. P. Ehmele. 1994. Nitrogen use efficiency of different winter crop cultivars in relation to the production technique and cultivation method. p. 54-55. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy.* ESA, Abano-Padova. Italy.
- Augustin, J., R. E. McDole and G. C. Painter. 1977. Influence of fertilizer, irrigation, and storage treatments on nitrate-N content of potato tubers. *Am. potato J.* 54: 125-136.
- Avnimelech, Y. and M. Laher. 1977. Ammonia volatilization from soils: equilibrium considerations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 1080-1084.

- Baethgen, W. E. and M. M. Alley. 1989. Optimizing soil and fertilizer nitrogen use by intensively managed winter wheat. II. Critical levels and optimum rates of nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 81: 120-125.
- Balashov, E. V. 1996. Effect of organic matter content on some physical properties of soils. p. 224-225. *In*: M. K. van Ittersum, G. Venner, S. van Geijn and T. Jetten (eds). Fourth Congress of European Society for Agronomy. ESA, Veldhoven, The Netherlands.
- Baldock, J. O. and R. B. Musgrave. 1980. Manure and mineral fertilizer effects in continuous and rotational crop sequences in Central New York. *Agron. J.* 72: 511-518.
- Balik, J., P. Tlustos, V. Vanek, and J. Procházka. 1994. Content of nitrates in waters of Czech Republic. p. 766-767. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Bansal, K. N., D. P. Motiramani and A. R. Pal. 1983. Studies on sulphur in vertisols. I. Soil and Plant tests for diagnosing sulphur deficiency in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Plant Soil* 70: 133-140.
- Barak, P., J. A. E. Molina, A. Hadas and C. E. Clapp. 1990. Mineralization of amino acids and evidence of direct assimilation of organic nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 769 - 774.
- Bar-Akiva, A., J. Sagiv and J. Leshem. 1970. Nitrate reductase activity as an indicator for assessing the nitrogen requirement of grass crops. *J. Sci. Food Agric.* 21: 405-407.
- Barbee, G. L. and K. W. Brown. 1986. Comparison between suction and free-drainage soil solution samplers. *Soil Sci.* 141: 149-154.
- Barber, K. L., L. D. Maddux, D. E. Kissel and G. M. Pierzynski. 1992. Corn response to ammonium- and nitrate-nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1166-1171.
- Barber, S. A. 1995. *Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach.* 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Baret, F. and T. Fourty. 1997. Radiometric estimates of nitrogen status of leaves. p. 201-227. *In*: G. Lemaire (ed.). *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Springer, Germany.
- Barraclough, D., M. J. Hyden and G. P. Davies. 1983. Fate of fertilizer nitrogen applied to grassland. I. Field leaching results. *J. Soil Sci.* 34: 483-497.
- Barraclough, P. B. 1993. Nutrient storage pool concentrations in plants as diagnostic indicators of nutrient sufficiency. *Plant Soil* 155/156: 175-178.
- Bates, T. E. 1971. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. *Soil Sci.* 112 (2): 116-130.
- Batey, T. 1977. Prediction by leaf analysis of nitrogen fertilizer required for winter wheat. *J. Sci. Food. Agric.* 28: 275-278.
- Bauder, J. W. and B. R. Montgomery. 1980. N-source and irrigation effects on nitrate leaching. *Agron. J.* 72: 593 - 596.
- Beauchamp, E. G. 1987. Corn response to residual N from urea and manures applied in previous years. *Can. J. Soil Sci.* 67: 931-942.
- Beckwith, C. P., J. Cooper, K. A. Smith and M. A. Shepherd. 1998. Nitrate leaching loss following application of organic manures to sandy soils in arable cropping. I. Effects of application time, manure type, overwinter crop cover and nitrification inhibition. *Soil Use Manag.* 14: 123-130.
- Bell, P. F., W. B. Hallmark, W. E. Sabbe, and D. G. Dombeck. 1995. Diagnosing nutrient deficiencies in soybean, using M-DRIS and critical nutrient level procedures. *Agron. J.* 87: 859-865.
- Benbi, D. K., C. R. Biswas, S. S. Bawa and K. Kumar. 1998. Influence of farmyard manure, inorganic fertilizers and weed control practices on some soil physical properties in a long-term experiment. *Soil Use Manag.* 14: 52-54.

- 7
- Benoit, G. R., C. D. Stanley, W. J. Grant and D. B. Torrey. 1983. Potato top growth as influenced by temperatures. *Am. Potato J.* 60: 489-501.
- Berchtold, A., J.-M. Bensson and V. Feller. 1993. Effects of fertilization levels in two farming systems on senescence and nutrient contents in potato leaves. *Plant Soil* 154: 81-88.
- Beverly, R. B., J. C. Stark, J. C. Ojala, and T. W. Embleton. 1984. Nutrient diagnosis of 'Valencia' oranges by DRIS. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109 (5): 649-654.
- Bhan, K. C., A. Wallace and O. R. Lunt. 1959. Some mineral losses from leaves by leaching. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 73: 289-293.
- Binford, G. D., A. M. Blackmer, and N. M. El-Hout. 1990. Tissue test for excess nitrogen during corn production. *Agron. J.* 82: 124-129.
- Bingeman, C. W., J. E. Varner and W. P. Martin. 1953. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Sci. Soc. Proc.* 17: 34-38.
- Birch, J. A., J. R. Devine, M. R. J. Holmes and J. D. Whitear. 1967. Field experiments on the fertilizer requirements of maincrop potatoes. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 69: 13-24.
- Bischoff, M., A. M. Hiar and R. F. Turco. 1996. Evaluation of nitrate analysis using test strips: comparison with two analytical laboratory methods. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (15-17): 2765-2774.
- Bitzer, C. C. and J. T. Sims. 1988. Estimating the availability of nitrogen in poultry manure through laboratory and field studies. *J. Environ. Qual.* 17: 47-54.
- Black, C. A. 1993. *Soil Fertility Evaluation and Control*. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.
- Blackmer, A. M. and C. J. Green. 1995. Nitrogen turnover by sequential immobilization and mineralization during residue decomposition in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1052-1058.
- Blackmer, T. M. and J. S. Schepers. 1994. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (9&10): 1791-1800.
- Blackmer, T. M., J. S. Schepers and M. F. Vigil. 1993. Chlorophyll meter readings in corn as affected by plant spacing. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24 (17&18): 2507-2516.
- Blackmer, T. M., J. S. Schepers, G. E. Varvel and E. A. Walter-Shea. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron. J.* 88: 1-5.
- Boesce, L. 1994. Testung und vergleich verschiedener methoden zur beurteilung des N-Ernährungszustandes von winterweizenbeständen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157: 53-60.
- Bolin, B. and E. Arrhenius. 1977. Nitrogen - An essential life factor and a growing environmental hazard. *Ambio* 6 (2-3): 96-105.
- Bonde, T. A. and T. Rosswall. 1987. Seasonal variation of potentially nitrogen in four cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1508-1514.
- Boone, R. D. 1990. Soil organic matter as a potential net nitrogen sink in a fertilized cornfield, South Deerfield, Massachusetts, USA. *Plant Soil* 128: 191-198.
- Borin, M. and U. Grigolo. 1994. Influence of type of soil and fertilization on quality of potato tubers for industrial processing. p. 586-587. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.*
- Borin, M. e L. Magrini. 1989. Fertilizzazione azotata ed organica della patata da industria (*Solanum tuberosum* L.): aspetti produttivi ed efficienza dell' azoto. *Riv. Agron.* 23: 43 - 50.
- Boswell, F. C., J. J. Meisinger, and N. L. Case. 1985. Production, marketing, and use of nitrogen fertilizers. p. 229-292. *In: O. P. Engelstad (ed.). Fertilizer Technology and Use. 3^a ed., SSSA, Madison, Wis.*

- Bould, C. 1961. Leaf analysis as a guide to the nutritional status of soft fruit crops. p. 3-15. *In*: W. Reuther (ed.). *Plant Analysis and Fertilizer Problems*. American Institute of Biological Sciences, Publ. No. 8. Washington.
- Boyd, D. A. 1959. The effect of farmyard manure on fertilizer responses. *J. Agric. Sci.* 52: 384-391.
- Breland, T. A. 1994 a. Enhanced mineralization and denitrification as a result of heterogeneous distribution of clover residues in soil. *Plant Soil* 166: 1 - 12.
- Breland, T. A. 1994 b. Measured and predicted mineralization of clover green manure at low temperatures and different depths in two soils. *Plant Soil* 166: 13-20.
- Bremner J. M. and A. M. Blackmer. 1978. Nitrous oxide: Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science* 199: 295-296.
- Bremner, J. M. 1996. Nitrogen-total. p. 1085-1121. *In*: D. L. Sparks (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3 – Chemical Methods*. SSSA. Book series n° 5. Madison, Wisconsin.
- Bremner, J. M. and K. Shaw. 1955. Determination of ammonia and nitrate in soil. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 46: 320-328.
- Brito, F. M. V. 1974-76. Diagnostique foliaire de l'olivier. Contribution pour un mode d'échantillonnage adapté aux oliverais du Portugal. *Rev. Ciências Agrárias* 1: 123-133.
- Broadbent, F. E. 1965. Effect of fertilizer nitrogen on the release of soil nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 692-696.
- Broadbent, F. E. 1980. Residual effects of labeled N in field trials. *Agron. J.* 72: 325-329.
- Broadbent, F. E. 1981. Methodology for nitrogen transformation and balance in soil. *Plant Soil* 58: 383-399.
- Broadbent, F. E. and T. Nakashima. 1967. Reversion of fertilizer nitrogen in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 648-652.
- Bronson, K. F., A. R. Mosier and S. R. Bishnoi. 1992. Nitrous oxide emissions in irrigated corn as affected by nitrification inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 161-165.
- Brown, J. R. and G. E. Smith. 1966. Soil fertilization and nitrate accumulation in vegetables. *Agron. J.* 58: 209-212.
- Bundy, L. G. and J. J. Meisinger. 1994. Nitrogen availability indices. p. 951-984. *In*: A. L. Page, R. H. Miller and R. Keeney. *Methods of Soil Analysis. Part 2 – Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. SSSA. Wisconsin.
- Bundy, L. G., R. P. Wolkowski and G. G. Weis. 1986. Nitrogen source evaluation for potato production on irrigated sandy soils. *Am. Potato J.* 63: 385-397.
- Buresh, R. J., E. G. Castillo and S. K. De Datta. 1993. Nitrogen losses in puddled soils as affected by timing of water deficit and nitrogen fertilization. *Plant soil* 157: 197-206.
- Burge, W. D. and F. E. Broadbent. 1961. Fixation of ammonia by organic soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25: 199-202.
- Cabrera, M. L., M. F. Vigil and D. E. Kissel. 1994. Potential nitrogen mineralization: laboratory and field evaluation. p. 15-30. *In*: *Soil Testing: prospects for improving nutrient recommendations*. J. L. Havlin and J. S. Jacobsen (eds). SSSA, spec. publ. n° 40.
- Campbell, C. A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen, and fertility. p. 173-271. *In* M. Schnitzer, e S. V. Khan (eds.). *Soil Organic Matter. Developments in Soil Science*, n° 9, Elsevier. Amsterdam.
- Campbell, C. A., Y. W. Jame, A. Jalil and J. Schoenau. 1997. Use of hot KCl-NH₄-N to estimate fertilizer N requirements. *Can. J. Soil Sci.* 77: 161-166.
- Campbell, C. A., Y. W. Jame, O. O. Akinremi and H. J. Beckie. 1994. Evaluating potential N mineralization for predicting fertilizer N requirements on long term field

- experiments. p. 81-100. *In: Soil Testing: prospects for improving nutrient recommendations.* J. L. Havlin and J. S. Jacobsen (eds). SSSA, spec. publ. n° 40.
- Cao, W. and T. W. Tibbitts. 1993. Study of various NH₄⁺/NO₃⁻ mixtures for enhancing growth of potatoes. *J. Plant Nutr.* 16 (9): 1691-1704.
- Cao, W.; Tibbitts, T. W. (1994). Responses of potatoes to solution pH levels with different forms of nitrogen. *J. Plant Nutr.* 17(1): 109-126.
- Cardoso, J. C. 1974. A classificação dos solos de Portugal (nova versão). *Boletim de solos do SROA*, vol. 17, p. 14-46. Lisboa.
- Carneiro, J. P. e J. Q. Santos. 1996. Simultaneous use of pulp-mill sludge and poultry manure on rey-grass (*Lolium multiflorum* Lam.) fertilization. p. 317-321. *In: C. Rodriguez-Barrueco (ed.). Fertilizers and Environment.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Carter, J. N. and S. M. Bosma. 1974. Effect of fertilizer and irrigation on nitrate-nitrogen and total nitrogen in potato tubers. *Agron. J.* 66: 263-266.
- Carter, J. N., M. E. Jensen and S. M. Bosma. 1971. Interpreting the rate of change in nitrate-nitrogen in sugarbeet petioles. *Agron. J.* 63: 669-674.
- Carter, J. N., M. E. Jensen and S. M. Bosma. 1974. Determining nitrogen fertilizer needs for sugarbeets from residual soil nitrate and mineralizable nitrogen. *Agron. J.* 66: 319-323.
- Carter, J. N., O. L. Bennett and R. W. Pearson. 1967. Recovery of nitrogen under field conditions using nitrogen-15. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 50 - 56.
- Cassman, K. G., M. J. Kropff, J. Gaunt e S. Peng. (1993). Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: what are the key constraints? *Plant Soil* 155/156: 359 - 362.
- Castellanos, J. Z., and P. F. Pratt. 1981. Mineralization of manure nitrogen-correlation with laboratory indexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 354-357.
- Castelo Branco, M. A., M. G. Serrão, M. L. Fernandes, E. M. Sequeira, H. Domingues and F. P. Pires. 1993. Foliar diagnosis of sugarbeet: Mineral composition of leaves of different physiological age during the season. p. 137-146. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Castillon, P. 1998. Using a chlorophyll meter to assess the nitrogen nutrition status of maize. p. 334-335, vol II. *Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia*
- Castillon, P., F. Laurent and J. Ravail. 1994. Use the rapid nitrate test to characterize the nitrogen nutritional status of sorghum. p. 664-665. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy.* ESA, Abano-Padova, Italy.
- Castro, C. 1988. Efeito da adubação azotada e potássica sobre a produtividade e qualidade de duas cultivares de batata. *Anais da UTAD* 1: 117 - 123.
- Castro, C. 1994. Produtividade e qualidade de duas culturas de batata: resposta à adubação azotada. *Rev. Ciências Agrárias XVII* (4): 15 - 25.
- Cate Jr., R. B. and L. A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 658-660.
- Chambers, B. J. and K. A. Smith. 1992. Soil mineral nitrogen arising from organic manure application. *Asp. Appl. Biol.* 30: 135-143.
- Chambers, B. J., J. R. William and K. A. Smith. 1996. Residual effects of poultry manure and fertiliser nitrogen applications. p. 183-190. *In: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent).* Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Chancy, H. F. and E. J. Kamprath. 1987. Effect of nitrapyrin rate on nitrification in soils having different organic matter contents. *Soil Sci.* 144 (1): 29-35.

- Chapman, H. D. 1961. The status of present criteria for the diagnosis of nutrient conditions in citrus. p. 75-106. *In*: W. Reuther (ed.). Plant Analysis and Fertilizer Problems. American Institute of Biological Sciences, Publication No. 8. Washington.
- Chapot, J.-Y. 1994. Effect of cover crop, between wheat and maize on nitrate leaching and drainage. Lysimeter study on two soil texture types. p. 776-777. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Chapot, J.-Y. and P. Robin. 1994. Comparison of nitrogen uptake potential of six non leguminous cover crops after wheat. Estimate of some parameters of nitrate uptake. p. 778-779. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Chen, C. C., F. T. Turner and J. B. Dixon. 1989. Ammonium fixation by high-charge smectite in selected Texas Gulf Coast soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1035-1040.
- Chescheir, G. M., P. W. Westerman and L. M. Safley Jr. 1986. Laboratory methods for estimating available nitrogen in manures and sludges. *Agric. Wastes* 18: 175-195.
- Chevalier, P. and L. E. Schrader. 1977. Genotypic differences in nitrate absorption and partitioning of N among plant parts in maize. *Crop Sci.* 17: 897-901.
- Chichester, F. W., J. O. Legg and G. Stanford. 1975. Relative mineralization rates of indigenous and recently incorporated ^{15}N -labeled nitrogen. *Soil Sci.* 120 (6): 455-460.
- Chu, C., H. Plate and D. L. Matthews. 1984. Fertilizer injury to potatoes as affected by fertilizer source, rate and placement. *Am. Potato J.* 61: 591-597.
- Clarkson, D. T. and A. J. Warner. (1979). Relationships between root temperature and the transport of ammonium and nitrate ions by Italian and perennial ryegrass (*Lolium multiflorum* and *L. perenne*). *Plant Physiol.* 64: 557 - 561.
- Clay, D. E., G. L. Malzer and J. L. Anderson. 1990. Ammonia volatilization from urea as influenced by soil temperature, soil water content, and nitrification and hydrolysis inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 263-266.
- Clutterbuck, B. J. and K. Simpson. 1978. The interactions of water and fertilizer nitrogen in effects on growth pattern and yield of potatoes. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 91: 161-172.
- Coelho, J. C. e P. A. Pinto. 1994. Sistemas de agricultura sustentáveis. Ensaio para a clarificação de alguns conceitos. *Rev. Ciências Agrárias XVII* (3): 71-84.
- Coelho, M. P. 1992. Influência da nutrição azotada no crescimento, desenvolvimento e produção da batateira. Dissertação do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. ISA, Lisboa, 120 p.
- Commoner, B. 1977. Cost-risk-benefit analysis of nitrogen fertilization: a case history. *Ambio* 6 (2-3): 157-161.
- Constable, G. A., I. J. Rochester, J. H. Betts and D. F. Herridge. 1991. Prediction of nitrogen fertilizer requirements in cotton using petiole and sap nitrate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22 (13&14): 1315-1324.
- Convertini, G., D. Ferri and V. Rizzo. 1994. Nitrates dynamic in a vertisol profile cropped with different crop sequences and agrotechnical practices in southern Italy. p. 674-675. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Costa, C. 1991. Nitrogen rates and chlorophyll content in maize leaves. *Photosynthetica* 25 (3): 447-450.
- Costa, L. D. and R. Giovanardi. 1994. Nitrogen fertility and water regime influence on N use efficiency in sunflower and maize. p. 98-99. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.

- Coutinho, J. F. 1989. A análise de terra. Limitações, correlação, calibração e interpretação dos resultados. UTAD, Vila Real.
- Coutinho, J., J. Matos and D. Jorge. 1998. Patterns of nitrogen mineralization from organic amendments under aerobic incubation with soil. p. 45-46., vol II. Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia
- Crawford, D. M. and P. M. Chalk. 1993. Sources of N uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) and N transformations in soil treated with a nitrification inhibitor (nitrapyrin). *Plant Soil* 149: 59-72.
- Dahnke, W. C. and E. H. Vasey. 1973. Testing soils for nitrogen. p. 97-114. *In*: L. M. Walsh and J. D. Beaton (eds). *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA, Madison, Wis.
- Dahnke, W. C. and G. V. Johnson. 1990. Testing soils for available nitrogen. p. 127- 139. *In*: R. L. Westerman (ed.). *Soil testing and Plant Analysis*. 3^a ed. SSSA, Book Series n° 3.
- Dalbiès, A. and T. Doré. 1994 a. Agronomic consequences of set-aside; preliminary results. p. 678-679. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). *Third Congress of the European Society for Agronomy*. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Dalbiès, A. and T. Doré. 1994 b. Within- and between-field evaluation of soil nitrogen content after one year of set-aside. p. 784-785. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). *Third Congress of the European Society for Agronomy*. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Dara, S. T., P. E. Fixen and R. H. Gelderman. 1992. Sufficiency level and diagnosis and recommendation integrated system approaches for evaluating status of corn. *Agron. J.* 84: 1006-1010.
- De Datta, S. K. and F. E. Broadbent. 1988. Methodology for evaluating nitrogen utilization efficiency by rice genotypes. *Agron. J.* 80: 793-798.
- De Neve, S., J. Pannier and G. Hofman. 1996. Temperature effects on C- and N-mineralization from vegetable crop residues. p. 41-46. *In*: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). *Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent)*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- De Roo, H. C. and P.E. Waggoner. 1961. Root development of potatoes. *Agron. J.* 53: 15-17.
- Debosz, K. K., P. Schjønning and S. E. Simmelsgaard. 1996. N mineralization in undisturbed soil. p. 37-40. *In*: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). *Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent)*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Delphin, J.-E. 1986. Evaluation du pouvoir minéralisateur de sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. *Agronomie* 6 (5): 453-458.
- Delphin, J.-E., J. Y. Chapot et A. Schoellen. 1991. relations entre le pouvoir minéralisateur des sols et la minéralisation nette de l'azote au champ. *Agronomie* 11: 439-445.
- Denmead, O. T., R. Nulsen and G. W. Thurtell. 1978. Ammonia exchange over a corn crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 840-842.
- Dias, M. A. and M. M. Oliveira. 1987. Nitrate reductase and petiole nitrate as indicators of the nitrogen nutrition status of field grown sugar beet. *Agronomia Lusit.* 42 (3-4): 275-284.
- Djurhuus, J. and O. H. Jacobson. 1995. Comparison of ceramic suction cups and KCl extraction for the determination of nitrate in soil. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 387-395.
- Doll, E. C., D. R. Christenson and A. R. Wolcott. 1971. Potato yields as related to nitrate levels in petioles and soils. *Am. Potato J.* 48: 105-112.
- Donahue, R. L.; R. W. Miller and J. C. Shickluna. 1977. *Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas*. Trad. Jorge Reña. Editorial Dossat. Madrid.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1986. *Yield Response to Water*. FAO irrigation and drainage paper, n° 33, Rome.

- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO irrigation and drainage paper, n° 24, Rome.
- Douglas, B. F. and F. R. Magdoff. 1991. An evaluation of nitrogen indices for organic residues. *J. Environ. Qual.* 20: 368-372.
- Dow, A. I. and S. Roberts. 1982. Proposal: critical nutrient ranges for crop diagnosis. *Agron. J.* 74: 401-403.
- Dull, G. G., G. S. Birth and R. G. Leffler. 1989. Use of near infrared analysis for the nondestructive measurements of dry matter in potatoes. *Am. Potato J.* 66: 215-225.
- Dumenil, L. 1961. Nitrogen and phosphorus composition of corn leaves and corn yields in relation to critical levels and nutrient balance. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25: 295-298.
- Durieux, R. P., H. J. Brown, E. J. Stewart, J. Q. Zhao, W. E. Jokela and F. R. Magdoff. 1995. Implications of nitrogen management strategies for nitrate leaching potential: roles of nitrogen source and fertilizer recommendation system. *Agron. J.* 88: 884-887.
- Dyson, P. W. and D. J. Watson. 1971. An analysis of the effects on nutrient supply on the growth of potato crops. *Ann. Appl. Biol.* 69: 47-63.
- Elwali, A. M. O. and G. J. Gascho. 1983. Sugarcane response to P, K, and DRIS corrective treatments on Florida histosols. *Agron. J.* 75: 79-83.
- Elwali, A. M. O. and G. J. Gascho. 1984. Soil testing, foliar analysis, and DRIS as guides for sugarcane fertilization. *Agron. J.* 76: 466-470.
- Elwali, A. M. O., G. J. Gascho and M. E. Sumner 1985. DRIS norms for 11 nutrients in corn leaves. *Agron. J.* 77: 506-508.
- Engels, T. and H. Kuhlmann. 1993. Effect of rate of fertilizer on apparent net mineralization of N during and after cultivation of cereal and sugar beet crops. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 156: 149-154.
- Eno, C. F. 1960. Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags. *Soil Sci. Soc. Proc.* 24: 277-279.
- Epstein, E. and W. J. Grant. 1973. Water stress relations of the potato plant under field conditions. *Agron. J.* 65: 400-404.
- Ercoli, L., M. Mariotti and A. Masoni. 1996. Fate of nitrogen fertilizer applied to winter wheat. p. 344-345. *Proc. 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen.*
- Errebhi, M., C. J. Rosen and D. E. Birong. 1998. Calibration of a sap nitrate test for irrigated Russer Burbank potato. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (1 & 2): 23-35.
- Escano, C. R., C. A. Jones and G. Uehara. 1981. Nutrient diagnosis in corn grown on hydric dystrandeps: II. comparison of two systems of tissue diagnosis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1140-1144.
- Evanylo, G. K. 1989 a. Nitrogen fertilization effects on potato leaf nutrient status. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20 (1&2): 159-182.
- Evanylo, G. K. 1989 b. Rate and timing of nitrogen fertilizer for White potatoes in Virginia. *Am. Potato J.* 66: 461-470.
- Evanylo, G. K. and G. W. Zehnder. 1988. potato growth and nutrient diagnosis as affected by systemic pesticide and physiological growth stage. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19 (15): 1731-1745.
- Fageria, N. K., V. C. Baligar and C. A. Jones. 1997. *Growth and Mineral Nutrition Field Crops.* 2^a ed. Marcel Dekker. New York.
- Failla, O., G. Stringari, D. Porro and A. Scienza. 1993. Determination of leaf standards for apple trees and grapevines in northern Italy. p. 38-41. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- FAO/UNESCO. 1974. *Soil Map of the World.* Vol. 1. Paris.

- Fauci, M. F. and R. P. Dick. 1994. Plant response to organic amendements and decreasing inorganic nitrogen rates in soils from a long-term experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 134 - 138.
- Fenn, L. B. and D. E. Kissel. 1976. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 394-398.
- Ferrero, A. and F. Vidotto. 1998. Nitrate leaching in subsurface water in relation to different soil management during Autumn and Winter. p. 198-199, vol II. Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia.
- Ferri, D., D. De Giorgio and M. Rinaldi. 1994 b. Nitrogen balance from a 6-yr field fertilization study on a "sunflower-durum wheat" cropping system. p. 688-689. *In* M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Ferri, D., G. Convertini and P. Greco. 1994 a. Effects of soybean (as catch crop) on N-NO₃ and N-NH₄ of the soil cropped with tobacco following durum wheat in Southern Italy. p. 686-687. *In* M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Firestone, M. K. 1982. Biological denitrification. p. 289-318. *In*: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Firman, D. M. and E. J. Allen. 1988. Field measurements of the photosynthetic rate of potatoes grown with different amounts of nitrogen fertilizer. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 111: 85-90.
- Fisk, M. C. and S. K. Schmidt. 1995. Nitrogen mineralization and microbial biomass nitrogen dynamics in three Alpine tundra communities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1036-1043.
- Follett, R. H., R. F. Follett and A. D. Halvorson. 1992. Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 (7&8): 687-697.
- Fontes, P. C. R., R. A. Reis Jr. and P. R. G. Pereira. 1996. Critical potassium concentration and potassium/calcium plus magnesium ratio in potato petioles associated with maximum tuber yields. *J. Plant Nutr.* 19 (3&4): 657-667.
- Foth, H. D. and B. G. Ellis. 1997. *Soil Fertility*. Lewis Publishers. New York.
- Fotyma, E., M. Fotyma and D. Bezdusznik. 1994. The external and internal efficiency of nitrogen utilization by cereals. p. 482-483. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Fotyma, E., M. Fotyma and D. Bezdusznik. 1998. Chlorophyll meter (Spad-502, Minolta) a new tool for evaluating the nitrogen nutritional status of cereals. p. 304-305, vol II. Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia
- Fox, R. H. and W. P. Piekielek. 1978 a. Field testing of several nitrogen availability indexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 747-750.
- Fox, R. H. and W. P. Piekielek. 1978 b. A rapid method for estimating the nitrogen-supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 751-753.
- Fox, R. H., W. P. Piekielek and K. M. Macneal. 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (3&4): 171-181.
- Francis, G. S., K. M. Bartley and F. J. Tabley. 1998. The effect of winter cover crop management on nitrate leaching losses and crop growth. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 131: 299-308.
- Franco, A. A. and D. N. Munns. 1982. Plant assimilation and nitrogen cycling. *Plant Soil* 67: 1-13.

- Fraser, P. M., K. C. Cameron and R. P. Sherlock. 1994. Lysimeter study of the fate of nitrogen in animal urine returns to irrigated pasture. *Eur. J. Soil Sci.* 45: 439-447.
- Freney, J. R., K. Spencer and M. B. Jones. 1978. The diagnosis of sulphur deficiency in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 727-738.
- Friedrich, J. W., L. E. Schrader and E. V. Nordheim. 1979. N deprivation in maize during grain-filling. I. Accumulation of dry matter, nitrate-N, and sulfate-S. *Agron. J.* 71: 461-465.
- Gaiser, T., M. Bernard and K. Stahr. 1994. Nitrogen and carbon mineralization in cultivated Acrisols and Vertisols in a sub-humid tropical climate. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157: 375-381.
- Gallo, J. R., F. A. S. Coelho and S. A. Nóbrega. 1965. Análise de folíolos e pecíolos na diagnose da nutrição da batatinha. *Bragantia* 24 (30): 385-401.
- Gárate, A. 1994. Contaminación en el sistema suelo-planta. Curso Master, Fertilizantes y medio ambiente. Libro de resúmenes. p. 30-36. Dpto Química Agrícola. Univ. Autónoma de Madrid.
- Gardner, B. R. and J. P. Jones. 1975. Petiole analysis and the nitrogen fertilization of Russet Burbank potatoes. *Am. potato J.* 52: 195-200.
- Gargantini, H., H. G. Blanco, J. R. Gallo and S. A. Nóbrega. 1963. Absorção de nutrientes pela batatinha. *Bragantia* 22 (22): 267-290.
- Gashaw, L. and L. M. Mugwira. 1981. Ammonium-N and nitrate-N effects on the growth and mineral compositions of triticale, wheat, and rye. *Agron. J.* 73: 47-51.
- Gasser, J. K. R. 1964. Urea as a fertilizer. *Soils Fert.* XXVII (3): 175-180.
- Geypens, M. and H. Vandendriessche. 1996. Advisory systems for nitrogen fertilizer recommendations. *Plant Soil* 181: 31-38.
- Gharous, M., R. L. Westerman and P. N. Soltanpour. 1990. Nitrogen mineralization potential of arid and semiarid soil of Morocco. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 438 - 443.
- Gianello, C. and J. M. Bremner. 1986 a. A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17 (2): 195-214.
- Gianello, C. and J. M. Bremner. 1986 b. Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17 (2): 215-236.
- Gianello, C. and J. M. Bremner. 1988. A rapid steam distillation method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19 (14): 1551-1568.
- Gilbert, W. A., A. E. Ludwick and D. G. Westfall. 1981. Predicting in-season N requirements of sugarbeets based on soil and petiole nitrate. *Agron. J.* 73: 1018-1023.
- Giles, J. F., A. E. Ludwick and J. O. Reuss. 1977. Prediction of late season nitrate-nitrogen content of sugarbeet petioles. *Agron. J.* 69: 85-88.
- Giles, J. F., J. O. Reuss and A. E. Ludwick. 1975. Prediction of nitrogen status of sugarbeets by soil analysis. *Agron. J.* 67: 454-459.
- Girardin, P. H., R. Trendel, J.-L. Meyer, M. Birgaentzle and P. Freyss. 1993. Effects of conventional and multiple N application by fertigation on maize grain yields and NO₃⁻-N residues. p. 411-415. *In: M. A. C. Frago and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Giroux, M. 1984. Comparison of urea and ammonium nitrate as N-fertilizer sources for potato. *Am. Potato J.* 61: 522-523.
- Goffart, J. P. and J. Guiot. 1993. Nitrogen fertilization of potato and maize in relation to yield, quality of the production and risks to the environment. p. 641-649. *In: M. A. C. Frago and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

- Goh, K. M. and M. J. Malakouti. 1992. Preliminary nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium DRIS norms and indices for apple orchards in Canterbury, New Zealand. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 (13&14): 1371-1385.
- Gonçalves, D. A. 1985. Contribuição para o estudo do clima da bacia superior do rio Sabor. Tese de Doutorado. IUTAD, Vila Real.
- Goulding, K. W. T., C. P. Webster, D. S. Powlson and P. R. Poulton. 1993. Denitrification losses of nitrogen fertilizer applied to winter wheat following ley and arable rotations as estimated by acetylene inhibition and ^{15}N balance. *J. Soil Sci.* 44: 63-72.
- Granli, T. and O. C. Bøckman. 1994. Nitrous oxide (N_2O) from agriculture. p. 800-801. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Green, C. J. and A. M. Blackmer. 1995. Residue decomposition effects on nitrogen availability to corn following corn or soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1065-1070.
- Green, C. J., A. M. Blackmer and N. C. Yang. 1994. Release of fixed ammonium during nitrification in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1411-1415.
- Greenwood, D. J., J. J. Neeteson and A. Draycott. 1985 a. Response of potato to N fertilizer: Quantitative relations for components of growth. *Plant Soil* 85: 163 - 183.
- Greenwood, D. J., J. J. Neeteson and A. Draycott. 1985 b. Response of potatoes to N fertilizer: Dynamic model. *Plant Soil* 85: 185-203.
- Gregory, P. J., B. Marshall and P. V. Biscoe. 1981. Nutrient relations of winter wheat. 3. Nitrogen uptake, photosynthesis of flag leaves and translocation of nitrogen to grain. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 96: 539-547.
- Griffin, T. S. and O. B. Hesterman. 1991. Potato response to legume and fertilizer nitrogen sources. *Agron. J.* 83: 1004-1012.
- Grignani, C. and M. Acutis. 1994. Organic fertilization efficiency and nitrogen leaching in maize based forage systems. p. 804-805. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Gristina, L., R. Sarno, I. Poma and A. S. Frenda. 1996. Effects of organic manures on nitrogen availability, rates of mineralization under semi-arid conditions. p. 350-351. *Proc. of 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen.*
- Grove, J. H. and M. E. Sumner. 1982. Yield and leaf composition of sunflower in relation to N, P, K, and lime treatments. *Fert. Res.* 3: 367-378.
- Guarda, G., F. Tassoni and F. Zuffellato. 1994. Effects of mineral and organic nitrogen fertilizing on production and quality of potato chips. p. 600-601. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Gunaseena, H. P. M. and P. M. Harris. 1968. The effect of the time of application of nitrogen and potassium on the growth of the second early potato variety Craig's Royal. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 71: 283-296.
- Gunaseena, H. P. M. and P. M. Harris. 1969. The effect of CCC and nitrogen on the growth and yield of the second early potato variety Craig's Royal. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 73: 245-259.
- Gunaseena, H. P. M. and P. M. Harris. 1971. The effect of CCC, nitrogen and potassium on the growth and yield of two varieties of potatoes. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 76: 33-52.
- Gupta, A. and M. C. Saxena. 1976 a. Evaluation of leaf analysis as a guide to nitrogen and phosphorus fertilization of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Soil* 44: 597-605.
- Gupta, A. and M. C. Saxena. 1976 b. Total nitrogen concentration in leaves of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) as an index of nutritional status. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 87: 293-296

- Hageman, R. H., D. Flesher and A. Gitter. 1961. Diurnal variation and other light effects influencing the activity of nitrate reductase and nitrogen metabolism in corn. *Crop Sci.* 1: 201-204.
- Hall, J. M., B. L. Williams and K. Killham. 1994. Investigation of N mineralization-immobilization dynamics in blanket peat to optimize the N economy of improved grass pasture. *Eur. J. Agron.* 3 (4): 317-320.
- Hallmark, W. B., R. B. Beverly, H. F. Morris, L. M. Shuman, D. O. Wilson, F. C. Boswell, J. F. Adams and D. A. Wall. 1990. Continued modification of the M-DRIS for soybean. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21 (13-16): 1313-1328.
- Hamid, A. 1972. Efficiency of N uptake by wheat, as affected by time and rate of application, using N¹⁵-labelled ammonium sulphate and sodium nitrate. *Plant Soil* 37: 389-394.
- Hammes, P. S. and J. A. De Jager. 1990. Net photosynthetic rate of potato at high temperatures. *Potato Res.* 33: 515-520.
- Hansen, E. M. and J. Djurhuus. 1996. Nitrate leaching as affected by long-term N fertilization on a coarse sand. *Soil Use Manag.* 12: 199-204.
- Hanway, J. J. 1973. Experimental methods for correlating and calibrating soil tests. p. 55-66. In: L. M. Walsh and J. D. Beaton (ed.). *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA. Madison, Wis.
- Hargrove, W. L., D. E. Kissel and L. B. Fenn. 1977. Field measurements of ammonia volatilization from surface applications of ammonium salts to a calcareous soil. *Agron. J.* 69: 473-476.
- Harmsen, G. W. and D. A. van Schreven. 1955. Mineralization of organic nitrogen in soil. *Adv. Agron.* 7: 299-398.
- Harmsen, G. W. and D. J. Lindenbergh. 1949. Investigations on the nitrogen nutrition of plants. *Plant Soil II* (1): 1-29.
- Harmsen, K. and J. T. Moraghan. 1988. A comparison of the isotope recovery and difference methods for determining nitrogen fertilizer efficiency. *Plant Soil* 105: 55-67.
- Harris, P. J. 1988. Microbial transformations of nitrogen. p. 608-651. In: A. Wild (ed.). *Russell's Soil Conditions & Plant Growth*. 11^a ed., Longman Scientific & Technical, New York.
- Harris, P. M. 1978. Mineral nutrition. p. 195-243. In: P. M. Harris (ed.). *The Potato Crop - The Scientific Basis for Improvement*. Chapman & Hall. London.
- Harris, P. M. 1992. Mineral nutrition. p. 163-213. In: P. M. Harris (ed.). *The Potato Crop - The Scientific Basis for Improvement*. 2^a ed., Chapman & Hall. London.
- Harrison, R., D. B. Davies and S. Peel. 1996. Nitrogen uptake by cover crop at 7 sites in the UK: 1990-1993, 1996. p. 203-206. In: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). *Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent)*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Hart, P. B. S., J. H. Rayner and D. S. Jenkinson. 1986. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with ¹⁵N. *J. Soil Sci.* 37: 389-403.
- Hart, S. C., J. M. Stark, E. A. Davidson and M. K. Firestone. 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. p. 985-1018. In: A. L. Page, R. H. Miller and R. Keeney. *Methods of Soil Analysis. Part 2 - Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. SSSA. Wiscosin.
- Hatch, D. J., S. C. Jarvis and L. Philipps. 1990. Field measurement of nitrogen mineralization using soil core incubation and acetylene inhibition of nitrification. *Plant Soil* 124: 97-107.
- Havelka, U. D., M.G. Boyle and R. W. F. Hardy. 1982. Biological nitrogen fixation. p. 365-422. In: F. J. Stevenson (ed.). *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.

- Haynes, R. J. 1983. Soil acidification induced by leguminous crops. *Grass and Forage Science* 38: 1-11.
- Heckman, J. R., R. Govindasamy, D. J. Probst, E. A. Chamberlain, W. T. Hlubik, R. C. Mickel and E. P. Probst. 1996. Corn response to sidedress nitrogen in relation to soil nitrate concentration. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (3 & 4): 575-583.
- Hernandez, L. E., A. M. Ramon R. O. Carpena-Ruiz and A. Garate. 1995. Evaluation of nitrate nutrition indexes in maize leaves: metabolic nitrate, total nitrate content and nitrate reductase activity. *J. Plant Nutr.* 18 (5): 869-887.
- Herron, G. M., A. F. Dreier A. D. Flowerday W. L. Colville and R. A. Olson. 1971. Residual mineral N accumulation in soil and its utilization by irrigated corn (*Zea Mays* L.). *Agron. J.* 63: 322-327.
- Hiatt, A. J. and H. F. Massey. 1958. Zinc levels in relation to zinc content and growth of corn. *Agron. J.* 50: 22-24.
- Hoelt, R. G., D. R. Keeney and L. M. Walsh. 1972. Nitrogen and sulfur in precipitation and sulfur dioxide in the atmosphere in Wisconsin. *J. Environ. Qual.* 1(2): 203-208.
- Hofman, G., P. Verstegen, P. Demyttenaere, M. van Meirvenne, P. Delenote and G. Ampe. 1993. Comparison of row and broadcast N application on N efficiency and yield of potatoes. p. 359-365. *In: M. A. C. Frago and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Holding, A. J. 1982. Some priority research areas in nitrogen studies. *Plant Soil* 67: 81-90.
- Holliday, R. 1963. Effects of fertilizers upon potato yields and quality. p. 248-264. *In: J. D. Ivins e F. L. Milthorpe (eds). The Growth of the Potato.* Butterworths, London.
- Holliday, R., P. M. Harris and M. R. Baba. 1965. Investigations into the mode of action of farmyard manure. I. The influence of soil moisture conditions on the response of maincrop potatoes to farmyard manure. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 64: 161-166.
- Holm, D. G. and R. E. Nylund. 1978. Use of mineral element content of potato petioles for predicting yield potential. *Am. Potato J.* 55: 291-305.
- Hong, S. D., R. H. Fox and W. P. Piekielek. 1990. Field evaluation of several chemical indexes of soil nitrogen availability. *Plant Soil* 123: 83-88.
- Hook, P. B. and I. C. Burke. 1995. Evaluation of methods for estimating net nitrogen mineralization in a semiarid grassland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 831-837.
- Hooker, M. L., D. H. Sander, G. A. Peterson and L. A. Daigger. 1980. Gaseous N losses from winter wheat. *Agron. J.* 72: 789-792.
- Hooker, W. J. 1986. Compendium of potato diseases. *Am. Phytop. Soc., St. Paul, Minnesota.*
- Houba, V. J. G., I. Novozamsky, A. W. M. Huybregts and J. J. van der Lee. 1986. Comparison of soil extractions by 0.01 M CaCl₂, by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant Soil* 96: 433-437.
- Houba, V. J. G., Th. M. Lexmond, I. Novozamsky and J. J. van der Lee. 1996. State of the art and future developments in soil analysis for bioavailability assessment. *Sci. Tot. Environ.* 178, 21-28.
- Houba, V. J., J. J. van der Lee, I. Novozamsky and I. Walinga. 1989. *Soil and Plant Analysis. Part 5 - Soil Analysis Procedures.* Wageningen.
- Howlett, F. S. 1961. Variation pattern established by foliar analysis of vegetable plants. p. 355-388. *In: W. Reuther (ed.). Plant Analysis and Fertilizer Problems.* American Institute of Biological Sciences, Publication No. 8. Washington.
- Hutchinson, G. L. and F. G. Viets Jr. 1969. Nitrogen enrichment of surface water by absorption of ammonia volatilized from cattle feedlots. *Science* 166: 515-515.
- Hylton Jr., L. O., D. E. Williams, A. Ulrich and D. R. Cornelius. 1964. Critical nitrate levels for growth of italian reyngrass. *Crop Sci.* 4: 16-19.

- Hylton, Jr. L. O., A. Ulrich and D. R. Cornelius 1965. Comparison of nitrogen constituents as indicators of the nitrogen status of Italian ryegrass, and relation of top to root growth. *Crop Sci.* 5: 21-22.
- Hylton, L. O., A. Ulrich and D. R. Cornelius. 1967. Potassium and sodium interrelations in growth and mineral content of Italian ryegrass. *Agron. J.* 59: 311-314.
- Intrigliolo, F., M. Fisichella, M. Tropea, G. Sambuco and A. Giuffrida. 1993. Influence of nitrogen nutrition on nutritional status and yield of 'navelina' orange. p. 439-444. *In: M. A. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.*
- Isfan, D. 1993. Genotypic variability for physiological efficiency index of nitrogen in oats. p. 189-195. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.*
- Islam, M. M. and F. N. Ponnamperna. 1982. Soil and plant tests for available sulfur in wetland rice. *Plant Soil* 68: 97-113.
- Jalil, A., C. A. Campbell, J. Schoenau, J. L. Henry, Y. W. Jame and G. P. Lafond. 1996. Assessment of two chemical extraction methods as indices of available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1954-1960.
- James, D. W., R. L. Hurst, D. T. Westermann and T. A. Tindall. 1994. Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: evaluating nutrient element interactions in petioles with response surfaces. *Am. Potato J.* 71: 249-265.
- James, D. W., W. H. Weaver and R. L. Reeder. 1970. Chloride uptake by potatoes and the effects of potassium chloride, nitrogen and phosphorus fertilization. *Soil Sci.* 109 (1): 48-52.
- Jansson, S. L. 1963. Balance sheet and residual effects of fertilizer nitrogen in a 6-year study with N¹⁵. *Soil Sci.* 95: 31-37.
- Jansson, S. L. and J. Persson. 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. p. 229-252. *In: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.*
- Jarrel, W. M. and R. B. Beverly. 1981. The dilution effect in plant nutrition studies. *Adv. Agron.* 34: 197-224.
- Jarvis S. C., E. A. Stockdale, M. A. Shepherd and D. S. Powlson. 1996. Nitrogen management in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Adv. Agron.* 57: 187-235.
- Jarvis, S. C., B. F. Hatch, B. F. Pain and J. V. Klarenbeek. (1994). Denitrification and the evolution of nitrous oxide after the application of cattle slurry to a peat soil. *Plant Soil* 166: 231-241.
- Jemison J. M. and R. H. Fox. 1988. A quick-test procedure for soil and plant tissue nitrates using test strips and a hand-held reflectometer. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19 (14): 1569-1582.
- Jenkins, P. D. and D. G. Nelson. 1992. Aspects of nitrogen fertilizer rate on tuber dry-matter content of potato cv. Record. *Potato Res.* 35: 127-132.
- Jenkinson, D. S. 1968. Chemical tests for potentially available nitrogen in soil. *J. Sci. Food Agric.* 19: 160-168.
- Jenkinson, D. S. 1971. Studies on the decomposition of C¹⁴ labelled organic matter in soil. *Soil Sci.* 111 (1): 64-70.
- Jenkinson, D. S. 1988. Soil organic matter and its dynamic. p. 564-607. *In: A. Wild (ed.). Russell's Soil Conditions & Plant Growth. 11^a ed., Longman Scientific & Technical, New York.*
- Jenkinson, D. S. and A. Ayanaba. 1977. Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 912-915.

- Jenkinson, D. S., R. H. Fox and J. H. Rayner. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called "priming" effect. *J. Soil Sci.* 36: 425-444.
- Jensen, E. S. 1992. The release and fate of nitrogen from catch-crop materials decomposing under field conditions. *J. Soil Sci.* 43: 335-345.
- Joern, B. C. and M. L. Vitosh. 1995 a. Influence of applied nitrogen on potato. Part I: yield, quality, and nitrogen uptake. *Am. Potato J.* 72: 51-63.
- Joern, B. C. and M. L. Vitosh. 1995 b. Influence of applied nitrogen on potato. Part II: recovery and partitioning of applied nitrogen. *Am. Potato J.* 72: 73-84.
- Jones Jr., J. B. and V. W. Case. 1990. Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. p. 389-427. *In: R. L. Westerman (ed.). Soil Testing and Plant Analysis.* 3rd ed. SSSA Book Series n° 3. SSSA, Madison, Wis.
- Jones Jr., J. B., H. V. Eck and R. Voss. 1990. Plant analysis as an aid in fertilizing corn and grain sorghum. p. 521-547. *In: R. L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis.* 3rd ed. SSSA Book Series n° 3. SSSA, Madison, Wis.
- Jones, C. A. and J. E. Bowen. 1981. Comparative DRIS and crop log diagnosis of sugarcane tissue analysis. *Agron. J.* 73: 941-944.
- Jones, M. B., C. C. Delwiche and W. A. Williams 1977. Uptake and losses of ¹⁵N applied to annual grass and clover in lysimeters. *Agron. J.* 69: 1019-1023.
- Jung, P. E., L. A. Peterson and L. E. Schrader. 1972. Response of irrigated corn to time, rate and source of applied N on sandy soils. *Agron. J.* 64: 668 - 671.
- Justes, E., J. M. Meynard, B. Mary and D. Plénet. 1997. Diagnosis using stem base extract: p. 163-187. *In: G. Lemaire (ed.). Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Springer. Germany.
- Justes, E., J.-M. Meynard, B. Mary and F. Laurent. 1994. JUBIL: a new method of conducting the nitrogen fertilization in wheat crops. p. 490-491. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy.* ESA, Abano-Padova, Italy.
- Kamoshita, A., S. Fukai, R. C. Muchow and M. Cooper. 1999. Grain nitrogen concentration differences among three sorghum hybrids with similar grain yield. *Aust. J. Agric. Res.* 50: 137-145.
- Kamukondiwa, W., L. Bergstroem, B. M. Campbell, P. G. H. Frost and M. J. Swift. 1996. N leaching in manured and ammonium nitrate fertilized lysimeters in Zimbabwe. p. 675-680. *In: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). Progress in nitrogen cycling studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent).* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Kanamori, T. and T. Yasuda. 1979. Immobilization, mineralization and the availability of the fertilizer nitrogen during the decomposition of the organic matters applied to the soil. *Plant Soil* 52: 219-227.
- Kantety, R. V., E. van Santen, F. M. Woods and C. W. Wood. 1996. Chlorophyll meter predicts nitrogen status of tall fescue. *J. Plant Nutr.* 19 (6): 881-899.
- Kapoor, A. C. and P. H. Li. 1982. effects of age and variety on nitrate reductase and nitrogen fractions in potato plants. *J. Sci. Food Agric.* 33: 401-406.
- Katyal, J. C., B. Singh, P. L. G. Vlek and R. J. Buresh. 1987. Efficient nitrogen use as affected by urea application and irrigation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 366-370.
- Keeney, D. R. 1982. Nitrogen-availability. p. 711-733. *In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (eds). Methods of Soil Analysis. Part 2 - Chemical and Microbiological Properties.* Agronomy, 9, 2nd ed. (1984), SSSA, Madison, Wis.
- Keeney, D. R. and J. M. Bremner. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agron. J.* 58: 498-503.

- Keeney, D. R. and J. M. Bremner. 1967. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 6. Mineralizable nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 34-39.
- Keisling, T. C., N. J. Mascagni Jr., R. L. Maples and K. C. Thompson. 1995. Using cotton petiole nitrate-nitrogen concentration for prediction of cotton nitrogen nutritional status on a clayey soil. *J. Plant Nutr.* 18 (1): 35-45.
- Kenworthy, A. L. 1949. Wheels of nutrition - A method of demonstrating nutrient-element balance. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 54: 47-52.
- Kleinkopf, G. E., D. T. Westermann and R. B. Dwelle. 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agron. J.* 73: 799-802.
- Kleinkopf, G. E., D. T. Westermann, M. J. Willes and G. D. Kleinschmidt. 1987. Specific gravity of Russet Burbank potatoes. *Am. Potato J.* 64: 579-587.
- Koe, T. 1993. Ciclos biogeoquímicos. Série Didáctica. Univ. Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real.
- Koo, R. C. J. and J. W. Sites. 1956. mineral composition of citrus leaves and fruit as associated with position on the tree. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 68: 245-252.
- Kropff, M. J. and C. J. T. Spitters. 1990. Introduction to crop ecology. Department of Theoretical Production Ecology. Wageningen.
- Kubát, J. and J. Lipavsky. 1994. Effect of manuring and fertilization on the humus content and quality in different soil and climatic conditions. p. 494-495. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.*
- Lacroix, Ch. R. 1994. Plant analysis as a guide in fertilizing strawberry. p. 618-619. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.*
- Lauer, D. A. 1985. Nitrogen uptake patterns of potatoes with high-frequency sprinkler-applied N fertilizer. *Agron. J.* 77: 193 - 197.
- Lauer, D. A. 1986 a. Response of Nooksack potatoes to nitrogen fertilizer. *Am. Potato J.* 63: 251-262.
- Lauer, D. A. 1986 b. Russet Burbank yield response to sprinkler-applied nitrogen fertilizer. *Am. Potato J.* 63: 61-69.
- Laura, R. D. 1975. On the "priming effect" of ammonium fertilizers. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39: 385.
- Laurent, F. et E. Justes. 1994. Fertilization azotée du blé d'hiver. Un nouvel outil JUBIL de pilotage. *Perspectives Agricoles* 190: 62-69.
- Leffelaar, P. A. and W. W. Wessel. (1988). Denitrification in a homogeneous, closed system: experiment and simulation. *Soil Sci.* 146 (5): 335 - 349.
- Legg, J. O. and F. E. Allison. 1959. Recovery of N^{15} -tagged nitrogen from ammonium-fixing soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* 23: 131-134.
- Legg, J. O. and J. J. Meisinger. 1982. Soil nitrogen budgets. p. 503-566. *In: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.*
- Legg, J. O., F. W. Chichester, G. Stanford and W. H. DeMar. 1971. Incorporation of ^{15}N -tagged mineral nitrogen into stable forms of soil organic nitrogen. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 273-276.
- Lemon, E. and R. van Houtte. 1980. Ammonia exchange at the land surface. *Agron. J.* 72: 876 - 883.
- Lewan, L. 1994. Effects of catch crop on leaching of nitrogen from a sandy soil: Simulations and measurements. *Plant Soil* 166: 137 - 152.

- Lewis, R. J. and S. L. Love. 1994. Potato genotypes differ in petiole nitrate-nitrogen concentrations over time. *HortScience* 29 (3): 175-179.
- Liang, B. C. and A. F. MacKenzie. 1994. Fertilization rates and clay fixed ammonium in two Quebec soils. *Plant Soil* 163: 103-109.
- Lindén, B., I. Lyngstad, J. Sippola, K. Søegaard and V. Kjellerup. 1992 a. Nitrogen mineralization during the growing season. 1. Contribution to the nitrogen supply of spring barley. *Swedish J. Agric. Res.* 22: 3-12.
- Lindén, B., I. Lyngstad, J. Sippola, K. Søegaard and V. Kjellerup. 1992 b. Nitrogen mineralization during the growing season. 2. Influence of soil organic matter content, and effect on optimum nitrogen fertilization of spring barley. *Swedish J. Agric. Res.* 22: 49-60.
- Lis, B. R., I. Ponce and R. Tizio. 1964. Studies on water requirements of horticultural crops. I. Influence of drought at different growth stages of potato on the tuber's yield. *Agron. J.* 56: 377-381.
- Little, T. M. and F. J. Hills. 1978. *Agricultural Experimentation - Design and Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 350 p.
- Lloyd, A. 1983. Urea as a fertiliser. *J. Sci. Food Agric.* 34: 711-712.
- Löhnis, F. 1926. Nitrogen availability of green manures. *Soil Sci.* XXII (4): 253-290.
- Loon, C. D. van, J. H. G. Slangen and J. H. Houwing. 1987. Nitrate content of leaf petioles as a guide to optimization of N-fertilization of ware potatoes. p. 146-147. Proc. 10 th Triennial Conference, EAPR, Aalborg, Denmark.
- Loon, C. D. van. 1981. The effect of water stress on potato growth, development, and yield. *Am. Potato J.* 58: 51-69.
- Lopes, C. M. 1989. Análise da influência da densidade de plantação no crescimento e produção de batata primor (*Solanum tuberosum* L.) e validação do modelo Potato 2. Dissertação do curso de Mestrado em Produção Vegetal, ISA, Lisboa, 116 p.
- Lopez-Cantarero, I., F. A. Lorente and L. Romero. 1994. Are chlorophylls good indicators of nitrogen and phosphorus levels. *J. Plant Nutr.* 17 (6): 979-990.
- Lorenz, O. A. 1944. Studies on potato nutrition: I. The effects of fertilizer treatment on the yield and composition of Kern County potatoes. *Am. Potato J.* 21: 179-192.
- Lorenz, O. A., B. L. Weir and J. C. Bishop. 1972. Effect of controlled-release nitrogen fertilizers on yield and nitrogen absorption by potatoes, cantaloupes, and tomatoes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 97 (3): 334-337.
- LQARS - Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva. 1986. *Recomendações de fertilização*. LQARS. Lisboa.
- Lucena, J. J. 1994. Diagnostico de la nutrición mineral de las plantas. Curso Master, Fertilizantes y medio ambiente. Libro de resúmenes. p. 51-52. Dpto Química Agrícola. Univ. Autónoma de Madrid.
- Lynch, J. M. and M. Wood. 1988. Interactions between plant roots and micro-organisms. p. 526-563. In: A. Wild (ed.). *Russell's Soil Conditions & Plant Growth*. 11^a ed., Longman Scientific & Technical, New York.
- MacKay, D. C. and J. S. Leefe. 1962. Optimum leaf levels of nitrogen, phosphorus and potassium in sweet corn and snap beans. *Can. J. Plant Sci.* 42: 238-246.
- MacKay, D. C., J. M. Carefoot and T. Entz. 1987. Evaluation of the DRIS procedure for assessing the nutritional status of potato (*Solanum tuberosum* L.), *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 18 (12): 1331-1353.
- MacKerron, D. K. L., M. W. Young and H. V. Davies. 1993. A method to optimize N-application in relation to soil supply of N, and yield of potato. *Plant Soil* 154: 139 - 144.

- MacLean, A. A. 1984. Time of application of fertilizer nitrogen for potatoes in Atlantic Canada. *Am. Potato J.* 61: 23-29.
- Macy, P. 1936. The quantitative mineral nutrient requirements of plants. *Plant Physiol.* 11: 749-764.
- MAFF - Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1985. *Fertiliser Recommendations. Reference book 209*, London.
- Magdoff, F. R. (1978). Influence of manure application rates and continuous corn on soil-N. *Agron. J.* 70: 629-632.
- Magdoff, F. R., D. Ross and J. Amadon. 1984. A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1301-1304.
- Magee, P. N. 1977. Nitrogen as health hazard. *Ambio* 6 (2-3): 123-125.
- Magnitski, K. P. 1961. The diagnosis of mineral nutrition of plants according to chemical composition of leaves. p. 159-179. *In: W. Reuther (ed.). Plant Analysis and Fertilizer Problems. American Institute of Biological Sciences, Publication No. 8. Washington.*
- Mahendrappa, M. K., R. L. Smith and A. T. Christiansen. 1966. Nitrifying organisms affected by climatic region in western United States. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30: 60-62.
- Mahmoudjafari, M., J. Kluitenberg, J. L. Havlin, J. B. Sisson and A. P. Schwab. 1997. Spatial variability of nitrogen mineralization at the field scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1214-1221.
- Maier, N., C. Williams, K. Potocky, D. Moss and G. Lomman. 1987. Interpretation standards for assessing the nutrient status of irrigated potato crops in SA. Department of Agriculture South Australia, Technote N° 1/87, 4 pp. Adelaide.
- Malavolta, E., S. A. Oliveira and G. C. Vitti. 1993. The use of diagnosis recommendation integrated system (DRIS) to evaluate the nutritional status of healthy and blight affected citrus trees. p. 157-159. *In: M. A. C. Frago and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.*
- Malo, B. and E. R. Purvis. 1964. Soil absorption of atmospheric ammonia. *Soil Sci.* 97: 242-247.
- Mambelli, S. and S. Grandi. 1994. Sugarbeet nitrogen uptake in relation to fertilizer N rate and distribution method. p. 174-175. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.*
- Marschner, H. 1986. *Mineral Nutrition of Higher Plants.* Academic Press, London, 674 p.
- Martinez, J. and G. Guiraud. 1990. A lysimeter study of the effects of a ryegrass catch crop, during a winter wheat/maize rotation, on nitrate leaching and on the following crop. *J. Soil Sci.* 41: 5-16.
- Martinoia, E., U. Heck and A. Wiemken. 1981. Vacuoles as storage compartments for nitrate in barley leaves. *Nature* 289: 292 - 293.
- Martin-Prével, P., J. Gagnaud and P. Gautier. 1987. *Plant analysis as a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops.* Lavoisier Publishing. Paris.
- Martins, F. M. 1990. *Estudos de crescimento de batata em condições mediterrânicas.* Tese de Doutoramento, UTAD, Vila Real, 354 p.
- Martins, M. I. M. (1994). *A fertilização azotada no milho em solos do Baixo Mondego. Contribuição para o seu estudo.* Dissertação do curso de mestrado em Nutrição Vegetal, Fertilidade dos Solos e Fertilização. ISA, Lisboa, 177 p.
- Mary, B. 1997. Concluding remarks: N hazards to crops and environment. p. 229-236. *In: G. Lemaire (ed.). Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Springer. Germany.
- Mary, B. and S. Recous. 1994. Measurements of nitrogen mineralization and immobilization fluxes in soil as a means of predicting net mineralization. *Eur. J. Agron.* 3 (4): 291-300.

- Mary, B., S. Recous, D. Darwis and D. Robin. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant Soil* 181: 71-82.
- Matar, A. E., D. P. Beck, M. Pala and S. Garabet. 1991. Nitrogen mineralization potentials of selected mediterranean soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22 (1 & 2): 23-36.
- Mataruka, D. F., W. J. Cox, J. M. Pleasant, H. M. van Es, S. D. Klausner and R. W. Zobel. 1993. Tillage and nitrogen source effects on growth, yield, and quality of forage maize. *Crop Sci.* 33: 1316-1321.
- Matos, J. R. 1997. Estudo da mineralização do azoto orgânico em diferentes correctivos. Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia Agrícola. UTAD, Vila Real.
- Maynard, D. N. and A. V. Barker. 1972. Nitrate content of vegetable crops. *HortScience* 7 (3): 224-226.
- Mazzarino, M. J., L. Oliva, A. Nuñez, G. Nuñez and E. Buffa. 1991. Nitrogen mineralization and soil fertility in the dry Chaco Ecosystem (Argentina). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 515-522.
- McDole, R. 1972. Influence of rate, timing and method of application of nitrogen on specific gravity of Russet Burbank tubers in Southeastern Idaho. *Am. Potato J.* 49: 356.
- McDole, R. E. and G. M. McMaster. 1978. Effects of moisture stress and nitrogen fertilization on tuber nitrate-nitrogen content. *Am Potato J.* 55: 611-619.
- McKenney, D. J., S.-W. Wang, C. F. Drury and W. I. Findlay. 1995. Denitrification, immobilization, and mineralization in nitrate limited and nonlimited residue-amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 118-124.
- McTaggart, I. P. and K. A. Smith. 1993. Estimation of potentially mineralisable nitrogen in soil by KCl extraction. II. Comparison with soil N uptake in the field. *Plant Soil* 157: 175 - 184.
- Meek, B. D., L. B. Grass and A. J. MacKenzie. 1969. Applied nitrogen losses in relation to oxygen status of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 575-578.
- Mehouachi, T. and R. Lemeur. 1993. Effect of nutritional stress on photosynthesis rate of potato (*Solanum tuberosum* L.). p. 541-546. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.*
- Meirvenne, M. van and G. Hofman. 1989. Spatial variability of soil nitrate after potatoes and its change during winter. *Plant Soil* 120: 103-110.
- Meisinger, J. J., V. A. Bandel, J. S. Angle and B. E. O'Keefe. 1992. Presidedress soil nitrate evaluation in Maryland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1527-1532.
- Meldal-Johnsen, A. and M. E. Sumner. 1980. Foliar diagnostic norms for potatoes. *J. Plant Nutr.* 2 (5): 569-576.
- Melsted, S. W., H. L. Motto and T. R. Peck. 1969. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agron. J.* 61: 17-20.
- Mendes, J. C. e M. L. Bettencourt. 1980. Contribuição para o estudo do balanço de água no solo e classificação climática de Portugal Continental. *In: Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (ed.). O Clima de Portugal. Fasc. XXIV, Lisboa.*
- Mengel, K. 1985. Dynamics and availability of major nutrients in soils. *Advances in Soil Science* 2: p. 63-131. *In: B. A. Stewart (ed.). Advances in Soil Science, Vol 2, 65-131. Springer-Verlag, New York.*
- Mengel, K. 1991. Available nitrogen in soils and its determination by the 'Nmin-method' and by electroultrafiltration (EUF). *Fert. Res.* 28: 251-262.
- Mengel, K. 1996. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant Soil* 181: 83-93.
- Mengel, K. and E. A. Kirkby. 1987. Principles of Plant Nutrition. 4^a ed. International Potash Institute, Bern, Switzerland.

- Mengel, K. and H. W. Scherer. 1981. Release of nonexchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil Sci.* 131: 226-232.
- Meyer, R. D. and D. B. Marcum. 1998. Potato yield, petiole nitrogen, and soil nitrogen response to water and nitrogen. *Agron. J.* 90: 420-429.
- Millard, P. and D. K. L. MacKerron. 1986. The effects of nitrogen application on growth and nitrogen distribution within the potato canopy. *Ann. Appl. Biol.* 109: 427-437.
- Millard, P. and S. Marshall. 1986. Growth, nitrogen uptake and partitioning within the potato (*Solanum tuberosum* L.) crop, in relation to nitrogen application. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 107: 421-429.
- Miller, H. F., J. Kavanaugh and G. W. Thomas. 1975. Time of N application and yields of corn in wet, alluvial soils. *Agron. J.* 67: 401-404.
- Mills, H. A. and J. B. Jones Jr. 1996. *Plant Analysis Handbook*. MicroMacro Publishing, Georgia, USA.
- Minotti, P. L. and D. L. Stankey. 1973. Diurnal variation in the nitrate concentration of beets. *HortScience* 8 (1): 33-34.
- Minotti, P. L., D. E. Halseth and J. B. Sieczka. 1994. Field chlorophyll measurements to assess the nitrogen status of potato varieties. *HortScience* 29 (12): 1497-1500.
- Mondy, N. I., B. Gosselin and L. M. Naylor. 1986. Nitrate-nitrogen content of potatoes as affected by sludge-amended soil. *Am. Potato J.* 63: 379-382.
- Montgomery, B. R., L. Prunty and J. W. Bauder. 1987. Vacuum trough extractors for measuring drainage and nitrate flux through sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 271-276.
- Morales, M. C. M., J. A. C. Wong and E. M. Tamargo. 1993. Diagnóstico nutricional de la vid, con dos valores óptimos de nutrientes, en la región lagunera. *ITEA*, 89 (1): 3-11
- Morard, P., A. Bernadac and G. Bertoni. 1993. An overall approach to plant nutrition through the use of square diagrams. p. 261-267. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Mosier, A. R., J. M. Duxubury, J. R. Freney, O. Heinemeyer and K. Minami. 1996. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant Soil* 181: 95-108.
- Mühling, K. H., E. Kutzmutz and B. Sattelmacher. 1994. Influence of nitrogen nutrition on nitrate concentration in potato tubers. p. 504-505. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy*. ESA, Abano-Padova, Italy.
- Müller, M. M. 1988. The fate of clover-derived nitrogen (¹⁵N) during decomposition under field conditions: Effects of liming and fertilization. *Plant Soil* 111: 121-126.
- Müller, M. M. and V. Sundman. 1988. The fate of nitrogen (¹⁵N) released from different plant materials during decomposition under field conditions. *Plant Soil* 105: 133-139.
- Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen - Inorganic forms. p. 1123-1184. *In: D. J. Sparks (ed). Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods*. SSSA-ASA. Madison, Wis.
- Munson, R. D. and W. L. Nelson. 1990. Principles and practices in plant analysis. p. 359-387. *In: R. L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis*. 3^a ed. SSSA Book Series n° 3. SSSA, Madison, Wis.
- Neeteson, J. J. 1989. Evaluation of the performance of three advisory methods for nitrogen fertilization of sugar beet and potatoes. *Nether. J. Agric. Sci.* 37: 143-155.
- Neeteson, J. J. and H. J. Zwetsloot. 1989. An analysis of the response of sugar beet and potatoes to fertilizer nitrogen and soil mineral nitrogen. *Nether. J. Agric. Sci.* 37: 129-141.
- Neeteson, J. J. and W. P. Wadman. 1987. assessment of economically optimum rates of fertilizer N on the basis of response curves. *Fertilizer Res.* 12: 37-52.

- Nelson, D. W. 1982. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. p. 327-363. *In*: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 961-1010. *In*: D. L. Sparks (ed). Methods of Soil Analysis. Part 3- Chemical Methods. SSSA, Book series n° 5. Madison, Wis.
- Nelson, L. A. and R. L. Anderson. 1977. Partitioning of soil test-crop response probability. p. 19-38. *In*: T. R. Peck, J. T. Cope, Jr. and D. A. Whitney (eds). Soil Testing: Correlating and Interpreting the Analytical Results. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Németh, K. 1979. The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Adv. Agron.* 31: 155-188.
- Németh, K. 1985. Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant Soil* 83: 1-19.
- Newbould, P. 1989. The use of nitrogen fertilizer in agriculture. Where do we go practically and ecologically. *Plant Soil* 115: 297-311.
- Ng Kee Kwong, K. F., J. Deville, P. C. Cavalot and V. Riviere. 1986. Biological immobilization of fertilizers nitrogen in humid tropical soils of Mauritius. *Soil Sci.* 141 (3): 195 - 199.
- Nightingale, H. I. 1972. Nitrates in soil and ground water beneath irrigated and fertilized crops. *Soil Sci.* 114 (4): 300-311.
- Nitsch, A. and E. Varis. 1991. Nitrate estimates using the Nitrachek Test for precise N-fertilization during plant growth and after harvest, for quality testing potato tubers. *Potato Res.* 34: 95-105.
- Nommik, H. and K. Vahtras. 1982. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. p. 123-171. *In*: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Nunes, J. M. 1992. Estudo da influência da fertilização azotada sobre o crescimento e produção de batata primor (*Solanum tuberosum*). Relatório de trabalho de fim de curso de Engenharia Agronómica. ISA. Lisboa.
- O'Beirne, D. and J. C. Cassidy. 1990. Effects of nitrogen fertilizer on yield, dry matter content and flouriness of potatoes. *J. Sci. Food Agri.* 52: 351 - 363.
- Oertli, J. J. 1975. Efficiency of nitrogen recovery from controlled-release urea under conditions of heavy leaching. *Agrochimica* XIX (3-4): 326-335.
- Ojala, J. C., J. C. Stark and G. E. Kleinkopf. 1990. Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality. *Am. Potato J.* 67: 29-43.
- Oliveira, M. D., C. F. Carranca, M. M. Oliveira and M. R. Gusmão. 1993. Diagnosing nutritional status of sugarbeet by soil and petiole analysis. p. 147-151. *In*: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Olsen, R. J., R. F. Hensler, O. J. Attoe, S. A. Witzel and L. A. Peterson. 1970. Fertilizer nitrogen and crop rotation in relation to movement of nitrate through soil profiles. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 448-452.
- Olson, R. A. and L. T. Kurtz (1982). Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. p. 567-604. *In*: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Olson, R. V. 1980. Fate of tagged nitrogen fertilizer applied to irrigated corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 514-517.
- Olson, R. V. and C. W. Swallow. 1984. Fate of labeled nitrogen fertilizer applied to winter wheat for five years. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 583 - 587.

- Olson, R. V., L. S. Murphy, H. C. Moser and C. W. Swallow. 1979. Fate of tagged fertilizer nitrogen applied to winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 973 - 975.
- Overrein, L. N. and P. G. Moe. 1967. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 57-61.
- Ozaki, K. 1961. The detection of asparagine as a criterion for top-dressing for rice in the field. p. 323-325. *In: W. Reuther (ed.). Plant Analysis and Fertilizer Problems.* American Institute of Biological Sciences, Publication No. 8. Washington.
- Paauw, F. van der. 1963. Residual effect of nitrogen fertilizer on succeeding crops in a moderate marine climate. *Plant Soil* XIX (3): 324-331.
- Palazzo, D., G. Basile, R. D' Agostinho, F. Intrigliolo, K. Chiriatti and C. Resina. 1993. An expert system for diagnosing citrus nutritional status and planning fertilization. p. 161-166. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Palta, J. A. and I. R. P. Fillery. 1993. Postanthesis remobilisation and losses of nitrogen in wheat in relation to applied nitrogen. *Plant Soil* 155/156: 179-181.
- Papastylianou, I. 1989. Diagnosing nitrogen fertilization requirements of cereals in less than 30 seconds. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20 (11&12): 1247-1259.
- Papastylianou, I. 1995. Diurnal variation of nitrate concentration in cereals grown under rainfed mediterranean conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (7&8): 1121-1131.
- Pare, T., E. G. Gregorich and B. H. Ellert. 1995. Comparison of soil nitrate extracted by potassium chloride and adsorbed on an exchange membrane *in situ*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (5&6): 883-898.
- Parent, L. E., A. N. Cambouris and A. Muhawenimana. 1994 b. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1432-1438.
- Parent, L. E., and M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117 (2): 239-242.
- Parent, L. E., D. Isfan, N. Tremblay and A. Karam. 1994 a. Multivariate nutrient diagnosis of the carrot crop. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119 (3): 420-426.
- Parr, J. F. 1973. Chemical and biochemical considerations for maximizing the efficiency of fertilizer nitrogen. *J. Environ. Qual.* 2 (1): 75-84.
- Paul, E. A. and F. E. Clark. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry.* 2nd ed. Academic Press. San Diego, Calif.
- Paul, J. W. and E. G. Beauchamp. 1993. Nitrogen availability for corn in soils amended with urea, cattle slurry, and composted manures. *Can. J. Soil Sci.* 73: 253-266.
- Pavlíková, D., J. Balík, V. Vanek and J. Vostal. 1994. Influence of different forms of N fertilizers on N uptake by poppy (*Papaver somniferum* L.). p. 204-205. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy.* ESA, Abano-Padova, Italy.
- Peeters, A. and V. van Bol. 1993. Relationship between aboveground dry weight and N, P and K concentrations in grassland species. A guide for the diagnosis of plant nutrient status. p. 50-54. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Peng, S., M. R. C. Laza, F. V. Garcia and K. G. Cassman. 1994. Microwave-oven drying of rice leaves for rapid determination of dry weight and nitrogen concentration. *J. Plant Nutr.* 17 (1): 209-217.
- Peng, S., M. R. C. Laza, F. V. Garcia, and K. G. Cassman. 1995. Chlorophyll meter estimates leaf area-based nitrogen concentration of rice. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26(5&6): 927-935.

- Penny, A., T. M. Addiscott and F. V. Widdowson. 1984. Assessing the need of maincrop potatoes for late nitrogen by using isobutylidene di-urea, by injecting nitrification inhibitors with aqueous N fertilizers and by dividing dressings of 'nitro-chalk'. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 103: 577-585.
- Peterson, L. A. and G. Chesters. 1964. A reliable total nitrogen determination on plant tissue accumulating nitrate nitrogen. *Agron. J.* 56: 89-90.
- Piekielek, W. P. and R. H. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agron. J.* 84: 59-65.
- Piekielek, W. P., R. H. Fox, J. D. Toth and K. E. Macneal. 1995. Use of chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agron. J.* 87: 403-408.
- Pierre, W. H., L. Dumenil and J. Henao. 1977 b. Relationship between corn yield, expressed as a percentage of maximum, and the N percentage in the grain. II. Diagnostic use. *Agron. J.* 69: 221-226.
- Pierre, W. H., L. Dumenil, Von D. Jolley, J. R. Webb and W. D. Shrader. 1977 a. Relationship between corn yield, expressed as a percentage of maximum, and the N percentage in the grain. I. Various N-rate experiments. *Agron. J.* 69: 215-220.
- Pinto, P. A. 1988. Computer simulation modeling of the growth and development of the potato crop under different water regimes. Dissertation, Doctor of Philosophy. Univ. Davies. Calif.
- Polizotto, K. R., G. E. Wilcox and C. M. Jones. 1975. Response of growth and mineral composition of potato to nitrate and ammonium nitrogen. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 100 (2): 165-168.
- Pomares-Garcia, F. and P. F. Pratt. 1978 a. Recovery of ^{15}N -labeled fertilizer from manured and sludge-amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 717-720.
- Pomares-Garcia, F. and P. F. Pratt. 1978 b. Value of manure and sewage sludge as N fertilizer. *Agron. J.* 70: 1065-1067.
- Poovarodom, S. and R. L. Tate. 1988. Nitrogen mineralization rates of the acidic, xeric soils of the New Jersey pinelands: Laboratory Studies. *Soil Sci.* 145 (5): 337 - 344.
- Portas, C. A. M. e F. M. Martins. 1981. Aptidão climática para a cultura da batata em Portugal Continental, com referência a um modelo de simulação. Associação Portuguesa de Horticultura. II Colóquio Nacional Sobre a Produção de Batata. Vila Real, 115 - 141 p.
- Porter, G. A. and J. A. Sisson. 1991 a. Petiole nitrate content of maine-grown Russet Burbank and Shepody potatoes in response to varying nitrogen rate. *Am. Potato J.* 68: 493-505.
- Porter, G. A. and J. A. Sisson. 1991 b. Response of Russet Burbank and Shepody potatoes to nitrogen fertilizer in two cropping systems. *Am. Potato J.* 68: 425-443.
- Porter, G. A. and J. A. Sisson. 1993. Yield, market quality and petiole nitrate concentrations of non-irrigated Russet Burbank and Shepody potatoes in response to sidedressed nitrogen. *Am. Potato J.* 70: 101-116.
- Powlson, D. S. 1993. Understanding the soil nitrogen cycle. *Soil Use Manag.* 9 (3): 86-94.
- Praag, H. J. van, V. Fischer and A. Riga. 1980. Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat as $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ and $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ studied in microplots through a four-course rotation: 2. Fixed ammonium turnover and nitrogen reversion. *Soil Sci.* 130: 100-105.
- Prasad, M. 1976. Nitrogen nutrition and yield of sugarcane as affected by N-serve. *Agron. J.* 68: 343-346.
- Prasad, M. and I. C. Ravenwood. 1986. Evaluation of a rapid sap nitrate test for yong kiwifruit vines. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17 (8): 829-837.

- Prasad, R. 1965. Determination of potentially available nitrogen in soils- A rapid procedure. *Plant Soil* XXIII (2): 261-264.
- Pratt, P. F., J. E. Warneke and P. A. Nash. 1976 c. Sampling the unsaturated zone in irrigated field plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 277-279.
- Pratt, P. F., S. Davis and R. G. Sharpless. 1976 a. A four-year field trial with animal manures. I. Nitrogen balances and yields. *Hilgardia* 44: 99-112.
- Pratt, P. F., S. Davis and R. G. Sharpless. 1976 b. A four-year field trial with animal manures. II. Mineralization of nitrogen. *Hilgardia* 44: 113-125.
- Prevot, P. and M. Ollagnier. 1961. Law of the minimum and balanced mineral nutrition. p. 257-277. In W. Reuther (Ed.). *Plant Analysis and Fertilizer Problems*. American Institute of Biological Sciences, Publication No. 8. Washington.
- Proebsting Jr., E. L. and A. L. Kenworthy. 1954. Growth and leaf analysis of montmorency cherry trees as influenced by solar radiation and intensity of nutrition. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 63: 41-48.
- Qian, P. and J. J. Schoenau. 1995. Assessing nitrogen mineralization from soil organic matter using anion exchange membranes. *Fert. Res.* 40: 143-148.
- Qian, P., J. J. Schoenau and W. Z. Huang. 1992. Use of ion exchange membranes in routine soil testing. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 (15 & 16): 1791-1804.
- Rachhpal-Singh and P. H. Nye. 1986 a. A model of ammonia volatilization from applied urea. I. Development of the model. *J. Soil Sci.* 37: 9-20.
- Rachhpal-Singh and P. H. Nye. 1986 b. A model of ammonia volatilization from applied urea. II. Experimental testing. *J. Soil Sci.* 37: 21-29.
- Rachhpal-Singh and P. H. Nye. 1988. A model of ammonia volatilization from applied urea. IV. Effect of method of urea application. *J. Soil Sci.* 39: 9-14.
- Raghupathi, H. B. and B. S. Bhargava. 1998. Diagnosis of nutrient imbalance in pomegranate by diagnosis and recommendation integrated system and compositional nutrient diagnosis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (19 & 20): 2881-2892.
- Raijmakers, W. M. F. and B. H. Janssen. 1993. Assessment of plant-available nitrogen in processed wastes. p. 107-115. In: M. A. C. Frago and M. L. van Beusichem (eds). *Optimization of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Raison, R. J., M. J. Connell and P. K. Khanna. 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biol. Biochem.* 19: 521-530.
- Rao, A. C. S., J. L. Smith, R. I. Papendick and J. F. Parr. 1991. Influence of added nitrogen interactions in estimating recovery efficiency of labeled nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1616 - 1621.
- Raposo, J. R. 1994. *A Rega por Aspersão*. 2^a ed., Clássica Editora, Lisboa.
- Rasmussen, P. E., R. E. Ramig, L. G. Ekin and C. R. Rohde. 1977. Tissue analysis guidelines for diagnosing sulphur deficiency in white wheat. *Plant Soil* 46: 153-163.
- Recous, R., J. M. Machet and B. Mary. 1988. The fate of labelled ¹⁵N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. *Plant Soil* 112: 215-224.
- Reddy, G. B. and R. R. Reddy. 1993. Fate of nitrogen-15 enriched ammonium nitrate applied to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 111 - 115.
- Rees, M. R., I. P. McTaggart and K. A. Smith. 1996. Potential nitrogen availability and fertiliser recommendations. p. 359-364. In: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). *Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent)*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Rees, R. M., I. P. McTaggart, K. A. Smith and E. A. Stockdale. 1994. Methodology for the study of N mineralization in the field. *Eur. J. Agron.* 3 (4): 301-309.
- Réfega, A. G. and A. A. Martins. 1984. Esboço da carta de solos da quinta de Santa Apolónia. E.S.A., Bragança (não publicado).

- Reichman, G. A., L. D. Grunes, C. W. Carlson and J. Alessi. 1959. N and P composition and yield of corn as affected by fertilization. *Agron. J.* 51: 575-578.
- Reluy, M., M. A. Gutiérrez and C. Cantero-Martínez. 1994. Response to nitrogen fertilization of two barley cultivars in a semiarid environment in the northeast of Spain. p. 222-223. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.*
- Reuss, J. O., P. N. Soltanpour and A. E. Ludwick. 1977. Sampling distribution of nitrates in irrigated fields. *Agron. J.* 69: 588-592.
- Reuther, W. 1961. Limitations of plant analysis as a research and diagnostic tool. p. 443-454. *In: W. Reuther (ed.). Plant Analysis and Fertilizer Problems. American Institute of Biological Sciences, Publication No. 8. Washington.*
- Rhue, R. D., D. R. Hensel and G. Kidder (1986). Effect of K fertilization on yield and leaf nutrient concentrations of potatoes grown on a sandy soil. *Am. Potato J.* 63: 665-681.
- Rible, J. M., P. A. Nash, P. F. Pratt and L. J. Lund. 1976. Sampling the unsaturated zone of irrigated lands for reliable estimates of nitrate concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 566-570.
- Rice, C. W. and J. L. Havlin. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendation. p. 1-13. *In: J. L. Havlin and J. S. Jacobsen (eds). Soil Testing: prospects for improving nutrient recommendations. SSSA, spec. publ. n° 40.*
- Roberts, S. and A. I. Dow. 1982. Critical nutrient ranges for petiole phosphorus levels of sprinkler-irrigated russet burbank potatoes. *Agron. J.* 74: 583-585.
- Roberts, S. and H. H. Cheng. 1988. Estimation of critical nutrient range of petiole nitrate for sprinkler-irrigated potatoes. *Am. Potato J.* 65: 119-124.
- Roberts, S. H. H. Cheng and F. O. Farrow. 1991. Potato uptake and recovery of nitrogen-15-enriched ammonium nitrate from periodic applications. *Agron. J.* 83: 378-381.
- Roberts, S., H. H. Cheng and F. O. Farrow. 1989. Nitrate concentration in potato petioles from periodic applications of ¹⁵N-labeled ammonium nitrate fertilizer. *Agron. J.* 81: 271-274.
- Roberts, S., W. H. Weaver and J. P. Phelps. 1980. Use of the nitrate soil test to predict sweet corn response to nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 306-308.
- Roberts, S., W. H. Weaver and J. P. Phelps. 1982. Effect of rate and time of fertilizer on nitrogen and yield of Russet Burbank potatoes under center pivot irrigation. *Am. potato J.* 59: 77-86.
- Robinson, J. B. D. 1967. Anaerobic incubation of soil and the production of ammonium. *Nature* 214: 534.
- Robinson, J. B. D. 1968. A simple available soil nitrogen index. I. Laboratory and greenhouse studies. *J. Soil Sci.* 19 (2): 269-279.
- Rockel, P., A. Rockel, J. Wildt and H.-J. Segschneider. 1996. Nitric oxide (NO) emission by higher plants. p. 603-606. *In: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.*
- Rodrigues, M A R 1995. Influência da fertilização mineral e orgânica na cultura da batata. Eficiência de utilização do azoto. Dissertação de Mestrado em Nutrição Vegetal, Fertilidade do Solo e Fertilização. ISA, Lisboa, 184p.
- Rodrigues, M. A. 1997. Análise de Plantas. Potencialidades e Limitações. Série Seminários. Instituto Politécnico de Bragança.
- Rodrigues, M. A. and J. Coutinho. 1998. Contribution of three manures to nitrogen nutrition of potato crop. p. 41-42, vol II. Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia.

- Rodrigues, M. A. e L. Sanches. 1998. Efeito do corte da semente no desenvolvimento e produção da cultura da batata. *Actas do VII Colóquio Nacional de Produção de Batata*. p. 73-81. Ass. Portuguesa de Horticultura. Oliveira do Bairro.
- Rodrigues, M. A. R. and J. F. Coutinho. 1996. Efficiency of uptake and utilization of N from mineral and organic sources by potato crop. p. 368-369. *Proc. of 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen*.
- Rodrigues, M. A., F. Martins and J. Coutinho. 1998 b. Influence of mineral and organic nitrogen on tuber dry matter and specific gravity of potatoes. p. 265-266, vol I. *Proc. of 5th ESA-Congress. Nitra, Slovakia*.
- Rodrigues, M. A., D. Barroso e E. Pereira. 1997. Efeito da densidade de plantação na produção de batata-semente. p. 340-348, vol. 2. *Actas do II Congresso Iberoamericano e III Congresso Ibérico de Ciências Hortícolas. Vilamoura*.
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho and F. Martins. 1999. Efficiency of organic nitrogen fertilisation of field vegetables crops in Northeast Portugal. *Acta Horticulturae (em publicação)*
- Rodrigues, M. A., J. Coutinho e F. Martins. 1998 a. Metodologias expeditas para maximizar a eficiência da fertilização azotada. p. 37-50. *Actas do VII Colóquio Nacional de Produção de batata. Associação Portuguesa de Horticultura. Oliveira do Bairro*.
- Rolston, D. E., D. L. Hoffman and D. W. Toy. 1978. Field measurement of denitrification: I. Flux of N₂ and N₂O. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 863-869.
- Rosswall, T. and K. Paustian. 1984. Cycling of nitrogen in modern agricultural systems. *Plant Soil* 76: 3-21.
- Roth, G. W., R. H. Fox and H. G. Marshall. 1989. Plant tissue tests for predicting nitrogen fertilizer requirements of winter wheat. *Agron. J.* 81: 502-507.
- Ruijter, F. J. and A. J. Haverkort. 1996. Potato crop growth and nutrient concentration as influenced by soil-pH and potato cyst nematodes. p. 534-535. *Proc. of 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen*.
- Rykbost, K. A., N. W. Christensen and J. Maxwell. 1993. Fertilization of Russet Burbank in short-season environment. *Am. Potato J.* 70: 699-710.
- Saffigna, P. G. and D. R. Keeney. 1977. Nitrogen and chloride uptake by irrigated Russet Burbank potatoes. *Agron. J.* 69: 258 - 263.
- Saffigna, P. G., D. R. Keeney and C. B. Tanner. 1977. Nitrogen, chloride, and water balance whit irrigated Russet Burbank potatoes in a sandy soil. *Agron. J.* 69: 251 - 257.
- Saint-Fort, R., K. D. Frank and J. S. Schepers. 1990. Role of nitrogen mineralization in fertilizer recommendations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21 (13-16) 1945-1958.
- Sanchez, C. A., A. M. Blackmer, R. Horton and D. R. Timmons. 1987. Assessment of errors associated with plot size and lateral movement of nitrogen-15 when studying fertilizer recovery under field conditions. *Soil Sci.* 144 (5): 344-351.
- Sanderson, J. B. and R. P. White. 1987. Comparison of urea and ammonium nitrate as nitrogen sources for potatoes. *Am. Potato J.* 64: 165-176.
- Santos, J. Q. 1996. Fertilização - Fundamentos da Utilização dos Adubos e Correctivos. *Publicações Europa-América, Mem Martins*, 442 P.
- Santos, J. Q. 1995. Fertilização e poluição. *Reciclagem agro-florestal de resíduos orgânicos. J. Quelhas dos Santos, Lisboa*.
- Sarno, R., L. Gristina, I. Poma and V. Lombardo. 1996. Effects of winter cover crops on nitrogen availability and mineralization rates in clay soils under semi-arid conditions. p. 370-371. *Proc. of 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen*.
- Sattelmacher, B. and H. Marschner. 1979. Tuberization in potato plants as affected by application of nitrogen to the roots and leaves. *Potato Res.* 22 (49-57).

- Scaife, A., M. Turner and K. Stevens. 1983. Determination of critical petiole sap nitrate concentrations using test strips. *J. Sci. Food Agric.* 34: 714.
- Scaife, M. A. and A. Barnes. 1977. The relationship between crop yield and petiole nitrate concentration at various growth stage. *Plant Soil* 46: 705-712.
- Schaefer, N. L. 1986. Evaluation of a hand reflectometer for rapid quantitative determination of nitrate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17 (9): 937-951.
- Schepers, J. S. and J. J. Meisinger. 1994. Field indicators of nitrogen mineralization. p. 31-47. *In: Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations.* J. L. Havlin and J. S. Jacobsen (eds). SSSA, spec. publ. n° 40.
- Schepers, J. S., D. D. Francis, M. Vigil and F. E. Below. 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 (17-20): 2173-2187.
- Schjønning, P., B. T. Christensen and B. Carstensen. 1994. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *Eur. J. Soil Sci.* 45: 257-268.
- Schmidt, E. L. 1982. Nitrification in soil. p. 253-288. *In: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils.* Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Schnier, H. F. 1994. Nitrogen-15 recovery fraction in flooded tropical rice as affected by Added Nitrogen Interaction. *Eur. J. Agron.* 3 (2): 161-167.
- Serna, M. D. and F. Pomares. 1992. Indexes of assessing N availability in sewage sludges. *Plant Soil* 139: 15-21.
- Setatou, H. and A. Simonis. 1994. Relationships between soil mineral N and crop yields and responses to N-fertilizers. p. 528-529. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy.* ESA, Abano-Padova, Italy.
- Setatou, H. and A. Simonis. 1996. Laboratory methods of measuring soil nitrogen status and correlation of measurements with crop responses. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27(3&4): 651-663.
- Shadchina, T. M. and V. V. Dmitrieva. 1995. Leaf chlorophyll content as a possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. *J. Plant Nutr.* 18 (7): 1427-1437.
- Shaviv, A. 1993. Controlled supply of fertilizers for increasing use efficiency and reducing environmental damage. p. 651-656. *In: M. A. C. Fragoso and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Shepherd, M. A., E. A. Stockdale, D. S. Powlson and S. C. Jarvis. 1996. The influence of organic nitrogen mineralization on the management of agricultural systems in the UK. *Soil Use Manag.* 12: 76-85.
- Shoji, S., A. T. Gandeza and K. Kimura. 1991. Simulation of crop response to polyolefin-coated urea: II. Nitrogen uptake by corn. *Soil Sci. Am. J.* 55: 1468 - 1473.
- Simpson, K. 1986. *Fertilizers and Manures.* Longman Scientific & Technical, England, 254 p.
- Sims, J. T., B. L. Vasilas, K. L. Gartley, B. Milliken and V. Green. 1995. Evaluation of soil and plant nitrogen test for maize on manured soils of the atlantic coastal plain. *Agron. J.* 87: 213-222.
- Singh, J. P. 1993. Tissue analysis technology for nitrogen fertilization of potato grown under subtropics short day conditions. *Fert. Res.* 36: 19-27.
- Smeal, D. and H. Zhang. 1994. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (9&10): 1495-1503.
- Smiciklas, K. D. and F. E. Below. 1992. Role of nitrogen form in determining yield of field-growth maize. *Crop Sci.* 32: 1220-1225.

- Smith, C. M. 1977. Interpreting inorganic nitrogen soil tests: sample depth, soil water, climate, and crops. p. 85-98. *In: Soil Testing: Correlating and Interpreting the Analytical Results*. ASA, Spec. Publ. n° 29. Madison, Wis.
- Smith, K. A. and B. J. Chambers. 1993. Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms-problems and practical solutions. *Soil Use Manag.* 9 (3): 105-112.
- Smith, K. A. and S. Li. 1993. Estimation of potentially mineralisable nitrogen in soil by KCl extraction. I. Comparison with pot experiments. *Plant Soil* 157: 167 - 174.
- Smith, P. F. 1962. Mineral analysis of plant tissues. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 13: 81-108.
- Smith, S. J. and G. Stanford. 1971. Evaluation of a chemical index of soil nitrogen availability. *Soil Sci.* 111 (4): 228-232.
- Smith, S. J., F. W. Chichester and D. E. Kissel. 1978. Residual forms of fertilizer nitrogen in field soils. *Soil Sci.* 125 (3): 165-169.
- Smith, S. J., L. B. Yong and G. E. Miller. 1977. Evaluation of soil nitrogen mineralization potentials under modified field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 74-76.
- Sørensen, J. N. and K. Thorup-Kristensen. 1993. Nitrogen effects of non-legume catch crops. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 156: 55-59.
- Sousa, J. R., M. Roboredo e J. Coutinho. 1999. Factores do solo que influenciam a perda de NH₃ dos adubos azotados. p.518. 14 Congresso Latinoamericano de la Ciencia del suelo. p. 518. Temuco, Chile.
- Staley, T. E., W. H. Caskey and D. G. Boyer. 1990. Soil denitrification and nitrification potentials during the growing season relative. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1602 - 1608.
- Stanford, G. 1968. Extractable organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils. *Soil Sci.* 106: 345-351.
- Stanford, G. 1982. Assessment of soil nitrogen availability. p. 651-688. *In: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.*
- Stanford, G. and E. Epstein. 1974. nitrogen mineralization-water relations in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38: 103- 107.
- Stanford, G. and J. O. Legg. 1968. Correlation of soil N availability indexes with N uptake by plants. *Soil Sci.* 105 (5): 320-326.
- Stanford, G. and J. Smith. 1976. Estimating potentially mineralizable soil nitrogen from a chemical index of soil nitrogen availability. *Soil Sci.* 122 (2): 71-76.
- Stanford, G. and J. Smith. 1978. Oxidative release of potentially mineralizable soil nitrogen by acid permanganate extraction. *Soil Sci.* 126 (4): 210-218.
- Stanford, G. and S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 465-472.
- Stanford, G. and W. H. DeMar. 1969. Extraction of soil organic nitrogen by autoclaving in water: I. The NaOH-distillable fraction as an index of nitrogen availability in soils. *Soil Sci.* 107: 203-205.
- Stanford, G. and W. H. DeMar. 1970. Extraction of soil organic nitrogen by autoclaving in water: 3. Diffusible ammonia, an index of soil nitrogen availability. *Soil Sci.* 109: 190-196.
- Stanford, G., J. N. Carter and S. J. Smith. 1974. Estimates of potentially mineralizable soil nitrogen based on short-term incubations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38: 99-102.
- Stanford, G., J. N. Carter, D. T. Westermann and J. J. Meisinger. 1977. Residual nitrate and mineralizable soil nitrogen in relation to nitrogen uptake by irrigated sugarbeets. *Agron. J.* 69: 303-308.
- Stanford, G., M. H. Frere and D. H. Schwaninger. 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.* 115 (4): 321-323.

- Stanford, G., R. A. Vander Pol and S. Dzienia. 1975. Denitrification rates in relation to total and extractable soil carbon. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39 : 284 - 289.
- Stark, J. C., W. M. Jarrell, J. Letey and N. Valoras. 1983. Nitrogen use efficiency of trickle-irrigated tomatoes receiving continuous injection of N. *Agron. J.* 75: 672-676.
- Steenbjerg, F. 1951. Yield curves and chemical analysis. *Plant Soil* III (2): 97-109.
- Stefanson, R. C. 1972 a. Soil denitrification in sealed soil-plant systems. I. Effect of plants, soil water content and soil organic matter content. *Plant Soil* 33: 113-127.
- Stefanson, R. C. 1972 b. Soil denitrification in sealed soil-plant systems. II. Effect of soil water content and form of applied nitrogen. *Plant Soil* 37: 129-140.
- Stevenson, F. J. 1986. *Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients.* John Wiley & Sons, New York, 380 p.
- Stevenson, F. J., R. M. Harrison, R. Wetselaar and R. A. Leeper (1970). Nitrosation of soil organic matter: III. Nature of gases produced by reaction of nitrite with lignins. Humic substances, and phenolic constituents under neutral and slightly acidic conditions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 430-435.
- Stewart, B. A., Porter, L. K.; Johnson, D. D. (1963). Immobilization and mineralization of nitrogen in several organic fractions of soil. *Soil Sci. Soc. Proc.* 27: 302-304.
- Stojanovic, B. J. and F. E. Broadbent. 1956. Immobilization and mineralization rates of nitrogen during decomposition of plant residues in soil. *Soil Sci. Soc. Proc.* 20: 213-218.
- Storey, R. M. J. and H. V. Davies. 1992. Tuber quality. p. 507-569. *In: P. M. Harris (ed.). The Potato Crop - the Scientific Basis for Improvement.* 2^a ed., Chapman & Hall. London.
- Storrier, R. R. 1966. The pre-treatment and storage of soil samples for nitrogen analyses. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 106-113.
- Struik, P. C. and F. Bonciarelli. 1996. Nitrogen mineralization rates of dairy manure compost applied to different soil under controlled conditions. p. 240-241. *Proc. of 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen.*
- Stutte, C. A., R. T. Weiland and A. R. Blem. 1979. Gaseous nitrogen loss from soybean foliage. *Agron. J.* 71: 95-97.
- Subler, S., R. W. Parmelee and M. F. Allen. 1995. Comparison of buried bag and PVC core methods for *in situ* measurements of nitrogen mineralization rates in an agricultural soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (15 & 16): 2369-2381.
- Sulçe, S., P. C. Vong and F. Jacquin. 1994. Immobilization and remineralization of organic nitrogen in three cultivated soils of Albania. p. 540-541. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy.* ESA, Abano-Padova, Italy.
- Sumner, M. E. 1977 a. Application of Beaufils' diagnostic indices to maize data published in the literature irrespective of age and conditions. *Plant Soil* 46: 359-369.
- Sumner, M. E. 1977 b. Preliminary N, P, and K foliar diagnostic norms for soybeans. *Agron. J.* 69: 226-230.
- Sunderman H. D., A. B. Onken and L. R. Hossner. 1979. Nitrate concentration of cotton petioles as influenced by cultivar, row spacing, and n application rate. *Agron. J.* 71: 731-737.
- Suzuki, M. and L. B. MacLeod. 1977. Barley yields and tissue N, P, and K with high-low N supply for different growth periods. *Agron. J.* 69: 695-700.
- Svensson, K. S., E. Lewan and M. Clarholm. 1994. Effects of a regrass catch crop on microbial biomass and mineral nitrogen in an arable soil during winter. *Swedish J. Agric. Res.* 23: 31-38.

- Szucs, M., O. Van Cleemput and G. Hofman. 1996. Field measured net N mineralization pattern in an alluvial Chernozem soil in the Szigetkoz Region of Hungary. p. 299-302. *In*: O. Van Cleemput, G. Hofman and A. Vermoesen (eds). Progress in Nitrogen Cycling Studies (Proc. 8th Nitrogen Workshop, Ghent). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Tavares, P. M. T. 1993. Efeito da aplicação fraccionada de azoto na produção da batata. Relatório final de estágio da licenciatura em Engenharia Agrícola, UTAD, Vila Real.
- Tewelde, H., C. J. Fernandez, D. C. Foss and L. G. Unruh, Jr. 1995. Critical petiole nitrate-nitrogen for lint yield and enhanced maturity in pima cotton. *Agron. J.* 87: 223-227.
- Thomsen, I. K. 1993. Nitrogen uptake in barley after spring incorporation of ¹⁵N - labeled italian ryegrass into sandy soils. *Plant Soil* 150: 193 - 201.
- Timm, H., J. C. Bishop, K. B. Tyler, M. Zahara, V. H. Schweers and J. P. Guerard. 1983. Plant nutrient uptake and potato yield response to banded and broadcast nitrogen. *Am. Potato J.* 60: 577-585.
- Tisdale, S. L., W. L. Nelson and J. D. Beaton. 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. 4^a ed., Macmillan Publishing Company, New York, 754 p.
- Toledo, V. C., H. C. Lee and T. A. Watt. 1996. Nitrogen mineralization rate of dairy manure compost applied to different soil under controlled conditions. p. 240-241. Proc. 4th ESA-Congress. Veldhoven-Wageningen.
- Trehan, S. P. and A. Wild. 1993. Effects of an organic manure on the transformations of amonium nitrogen in planted and unplanted soil. *Plant Soil* 151: 287 - 294.
- Trindade, H. 1997. Fluxos e perdas de azoto em explorações forrageiras intensivas de bovinicultura leiteira no Noroeste de Portugal. Dissertação de Doutoramento. Univ. Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real.
- Tukey Jr., H. B., H. B. Tukey and S. H. Wittwer. 1958. Loss of nutrients by foliar leaching as determined by radioisotopes. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 71: 496-506.
- Turner, F. T. and M. F. Jund. 1991. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwarf rice. *Agron. J.* 83: 926-928.
- Tyler, K. B., F. E. Broadbent and J. C. Bishop. 1983. Efficiency of Nitrogen uptake by potatoes. *Am. Potato J.* 60: 261 - 269.
- Ulrich, A. 1943. Plant analysis as a diagnostic procedure. *Soil Sci.* 55: 101-112.
- Ulrich, A. 1950. Critical nitrate levels of sugar beets estimated from analysis of petioles and blades, with special reference to yields and sucrose concentrations. *Soil Sci.* 69: 291-309.
- Ulrich, A. and F. J. Hills. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing sugar crops: part I. Sugar beets. p. 271-288. *In*: L. M. Walsh and J. D. Beaton (eds.). *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis.
- Ulrich, A. and L. O. Hylton Jr. 1968. Sulfur nutrition of italian ryegrass measured by growth and mineral content. *Plant Soil* XXIX (2): 274-284.
- Ulrich, A. and W. L. Berry. 1961. Critical phosphorus levels for lima bean growth. *Plant Physiol.* 36: 626-632.
- van Dam, A. M. 1994. Photosynthesis in catch crops during Autumn and Winter in relation to nitrogen supply. p. 264-265. *In*: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.
- van Riemsdijk, W. H. and A. C. C. Plette. 1996. Introduction to soil chemical aspects of bioavailability. *In*: F. A. M. de Haan and M. I. Visser-Reyneveld (ed.). *Soil Pollution and Soil Protection*. International Training center (PHLO). Wageningen.
- Vanlauwe, B., L. Dendooven and R. Merckx. 1994. Residue fractionation and decomposition: The significance of the active fraction. *Plant Soil* 158: 263-274.

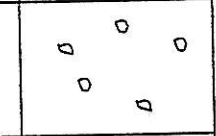
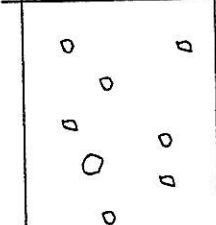
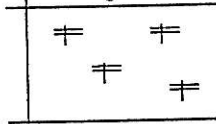
- Vanotti, M. B., S. A. Leclerc and L. G. Bundy. 1995. Short-term effects of nitrogen fertilization on soil organic nitrogen availability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1350-1359.
- Vasconcelos, E. P. 1992. Adubos de Libertação Lenta, de Acção Controlada ou de Libertação Gradual de Nutrientes. ISA, Lisboa (mimeo.).
- Vereijken, P. and C. D. van Loon. 1991. A strategy for integrated low-input potato production. *Potato Res.* 34: 57-66.
- Verstraeten, L. M. J., K. Vlassak and J. Livens. 1970 a. Factors affecting the determination of available soil nitrogen by chemical methods: I. Comparison of extractable with mineralized nitrogen. *Soil Sci.* 110 (5): 299-305.
- Verstraeten, L. M. J., K. Vlassak and J. Livens. 1970 b. Factors affecting the determination of available soil nitrogen by chemical methods. Comparison of extractable carbon by chemical methods. *Soil Sci.* 110 (6): 365-370
- Viets Jr., F. G. 1971. Water quality in relation to farm use of fertilizer. *BioScience* 21 (10): 460-467.
- Vigil, M. F. and D. E. Kissel. 1991. Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 757-761.
- Vinther, F. P. 1994. Nitrogen fluxes in a cropped sandy and loamy soil measured by sequential coring. *Eur. J. Agron.* 3 (4): 311-316.
- Vitosh, M. L. and G. H. Silva. 1994. A rapid petiole sap nitrate-nitrogen test for potatoes. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (3&4): 183-190.
- Vitosh, M. L. and G. H. Silva. 1996. Factors affecting potato petiole sap nitrate tests. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27(5-8): 1137-1152.
- Vitosh, M. L., G. H. Silva, R. D. Leep and D. S. Douches. 1992. Sap nitrate testing for improved nitrogen management on potatoes. *HortScience* 27 (6): 126.
- Volz, M. G., M. S. Ardakani, R. K. Schulz, L. H. Stolzy and A. D. McLaren. 1976. Soil nitrate loss during irrigation: enhancement by plant roots. *Agron. J.* 68: 621-627.
- Vos, G. J. M., I. M. Bergevoet, J. C. Védý and J. A. Neyroud. 1994. The fate of spring applied fertilizer N during the autumn-winter period: comparison between winter-fallow and green manure cropped soil. *Plant Soil* 160: 201-213.
- Vos, J. and M. Bom. 1993. Hand-held chlorophyll meter: a promising tool to assess the nitrogen status of potato foliage. *Potato Res.* 36: 301-308.
- Vos, J. and P. Putten. 1994. Nitrogen accumulation in catch crops. p. 846-847. *In: M. Borin and M. Sattin (eds). Third Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Abano-Padova, Italy.*
- Walters, D. T. and G. L. Malzer. 1990 a. Management and nitrification inhibitor effects on nitrogen-15 urea: I. Yield and fertilizer use efficiency. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 115 - 122.
- Walters, D. T. and G. L. Malzer. 1990 b. Management and nitrification inhibitor effects on nitrogen-15 urea: II. Nitrogen leaching and balance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 122 - 130.
- Walworth, J. L. and J. E. Muniz. 1993. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes. *Am. Potato J.* 70: 579-597.
- Walworth, J. L. and M. E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated System (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 150 - 188.
- Walworth, J. L., M. E. Sumner, R. A. Isaac and C. O. Plank. 1986 b. Preliminary DRIS norms for alfalfa in the southeastern United States and a comparison with midwestern norms. *Agron. J.* 78: 1046-1052.
- Walworth, J. L., W. S. Letzsch and M. E. Sumner. 1986 a. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 123-128.

- Ware, G. O., K. Ohki and L. C. Moon. 1982. The Mitscherlich plant growth model for determining critical nutrient deficiency levels. *Agron. J.* 74: 88-91.
- Waring, S. A. and J. M. Bremner. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* 201: 951-952.
- Warncke, D. D. 1996. Soil and plant tissue testing for nitrogen management in carrots. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (3 & 4): 597-605.
- Waskman, S. A. and F. G. Tenney. 1927. The composition of natural organic materials and their decomposition in the soil: II. Influence of age of plant upon the rapidity and nature of its decomposition-rye plants. *Soil Sci.* 24: 317-333.
- Waskom, R. M., D. G. Westfall, D. E. Spellman and P. N. Soltanpour. 1996. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (3&4): 545-560.
- Watson, D. J. 1963. Some features of crop nutrition. p. 233-247. *In:* J. D. Ivins e F. L. Milthorpe (eds). *The Growth of the Potato*. Butterworths, London.
- Weber, P. and H. Rennenberg. 1996. Exchange of NO and NO₂ between wheat canopy monoliths and the atmosphere. *Plant Soil* 180: 197-208.
- Westcott, M. P. and J. M. Wraith. 1995. Correlations of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (9&10): 1481-1490.
- Westcott, M. P., C. J. Rosen and W. P. Inskeep. 1993. Direct measurement of petiole sap nitrate in potato to determine crop nitrogen status. *J. Plant Nutr.* 16 (3): 515-521.
- Westcott, M. P., M. L. Knox and J. M. Wraith. 1994. Kinetics of soil-plant nitrate relations in potato and peppermint: a model for derivative diagnosis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (5&6): 469-478.
- Westcott, M. P., S. D. Cash, J. S. Jacobsen, G. R. Carlson and L. E. Welty. 1998. Sap analysis for diagnosis of nitrate accumulation in cereal forages. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (9 & 10): 1355-1363.
- Westcott, M. P., V. R. Stewart and R. E. Lund. 1991. Critical petiole nitrate levels in potato. *Agron. J.* 83: 844-850.
- Westerman, R. L. and L. T. Kurtz. 1973. Priming effect of ¹⁵N labeled fertilizers on soil nitrogen in field experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37: 725 - 727.
- Westermann, D. T. and J. R. Davis. 1992. Potato nutritional management changes and challenges into the next century. *Am. Potato J.* 69: 753-767.
- Westermann, D. T. and S. E. Crothers. 1980. Measuring soil nitrogen mineralization under field conditions. *Agron. J.* 72: 1009-1012
- Westermann, D. T., G. E. Kleinkopf and L. K. Porter. 1988. Nitrogen fertilizer efficiencies on potatoes. *Am. Potato J.* 65: 377 - 386.
- Westermann, D. T., S. M. Bosma and M. A. Kay. 1994 b. Nutrient concentration relationships between the fourth petiole and upper-stem of potato plants. *Am. Potato J.* 71: 817-828.
- Westermann, D. T., T. A. Tindall, D. W. James and R. L. Hurst. 1994 a. Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: yield and specific gravity. *Am. Potato J.* 71: 417-431.
- Wetselaar, R. and G. D. Farquhar. 1980. Nitrogen losses from tops of plants. *Adv. Agron.* 33: 263-302.
- Wheatley, R. E., S. E. Millar and D. W. Griffiths. 1996. The production of volatile organic compounds during nitrogen transformations in soils. *Plant Soil* 181: 163-167.
- Whitney, D. A., J. T. Cope and L. F. Welch. 1985. Prescribing soil and crop nutrient needs. p. 25-52. *In:* O. P. Engelstad (ed.). *Fertilizer Technology and Use*. 3^a ed., SSSA, Madison, Wis.

- Wild, A. 1988. Plant nutrients in soil: Nitrogen. p. 652-694. *In*: A. Wild (ed.). Russell's Soil Conditions & Plant Growth. 11^a ed., Longman Scientific & Technical. New York.
- Wilson, J. K. 1949. Nitrate in foods and its relation to health. *Agron. J.* 41: 20-22.
- Wright, M. J. and K. N. Davison. 1964. Nitrate accumulation in crops and nitrate poisoning in animals. *Adv. Agron.* 16: 197-217.
- Young, J. L. and R. W. Aldag. 1982. Inorganic forms of nitrogen in soils. p. 43-66. *In*: F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wis.
- Young, M. W., H. V. Davies and D. K. L. MacKerron. 1993. Comparison of techniques for nitrogen analysis in potato crops. p. 7-11. *In*: M. A. C. Frago and M. L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Zaccheo, P., L. Crippa and P. L. Genevini. 1993. Nitrogen transformation in soil treated with ¹⁵N labelled dried or composted regrass. *Plant Soil* 148: 193 - 201.
- Zadoks, J. C., T. T. Chang and C. F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14: 415-421.
- Zhen, R. G. and R. A. Leigh. 1990. Nitrate accumulation by wheat (*Triticum aestivum*) in relation to growth and tissue N accumulations. *Plant Soil* 124: 157-160.

7 – Anexos

7.1- Caracterização do perfil (Réfega e Martins, 1984)

Z (cm)	Morfologia	Amostra
0	Ap1	1
18	Ap2	2
33		3
80		4
120		5
193		6
230		

1 – Pardo forte 7,5 YR 5/6 (s); franco, com algum saibro, pouco cascalho anguloso e subanguloso, poucas pedras, material máfico; agregação anisoforme subangulosa, fina e média, fraca a moderada; compactidade pequena; consistência ligeiramente dura; pouco poroso, muito fino; bastantes raízes finas; fresco

2 – Pardo a pardo escuro 7,5 YR 4/4 (s); franco, com pouco saibro e cascalho, pouca pedra miúda e material idêntico ao primeiro; agregação anisoforme subangulosa fina e média, fraca; compactidade pequena; consistência ligeiramente dura; pouco poroso, muito fino; algumas raízes; seco a fresco.

3 – Pardo a pardo escuro 7,5 YR 4/4 (s); franco-argiloso, com algum saibro, cascalho, pouca pedra miúda, material rochoso heterogéneo; agregação anisoforme subangulosa fina e média, fraca a moderada; compactidade grande, consistência ligeiramente dura; pouco poroso a poroso, muito fino a fino; raras raízes finas; fresco.

4 – Pardo amarelo a pardo amarelo escuro 10 YR 4,5/6 (s); franco argiloso com bolsadas de material de boleamento evidente, natureza variada e preferencialmente com dimensão saibro e cascalho; sem agregação; compactidade grande; consistência ligeiramente dura e dura; fechado a pouco poroso, muito fino; sem raízes; fresco.

5 – Pardo forte 7,5 YR 5/6 em seco e húmido; franco-arenoso, predomínio quase total de material grosseiro solto em todas as paredes, sendo evidente boleamento em muito dele; misturado com rara terra; conjunto de coesão forte a média; sem raízes; fresco; há pedra de quartzo e material variado.

6 – Pardo amarelo 10 YR 5/6 com partes pardo oliveira claro 2 Y 5/4 e partes pardo forte 7,5 YR 5/6; argilo-limoso, rocha muito alterada, aparentemente homogénea e que se corta facilmente com o martelo.

Quadro A.7.1 – Registos das análises físico-químicas (Réfega e Martins, 1984)

Profundidade (cm)	00-15	15-30	40-70	90-115	130-160	195-210
El. gross. (%)	18,8	23,32	19,81	24,12	55,11	69,14
Ar. grossa (%)	17,7	17,1	21,3	7,1	30,0	6,1
Ar. fina (%)	42,6	54,7	45,0	49,7	46,0	47,2
Limo (%)	20,2	15,1	18,1	24,1	9,6	22,1
Argila (%)	19,5	13,1	15,6	19,1	14,4	24,6
Textura	Franco	Fr-arenoso	Franco	Franco	Fr-arenoso	Franco
Perm. inic. (cm/h)	0,43*	0,40*	0,80**	0,77**	24,12****	0,31*
Perm. const. (cm/h)	0,26*	0,20*	0,32*	0,99**	7,68****	0,29*
% a pF 2,0	24,28	25,90	23,74	27,14	18,14	43,06
% a pF 2,7	17,22	17,89	16,18	17,49	11,56	32,97
% a pF 4,2	8,13	8,82	7,79	9,29	5,65	21,00
Dens. real	2,60	2,56	2,44	2,35	2,39	2,22
Dens. aparente	1,40	1,39	1,32	1,25	1,32	1,00
Poros. total (%)	46,17	45,83	46,39	47,35	44,69	56,56
C. máx. p. água (%)	33,05	33,02	35,43	38,24	33,85	58,60
Expansibilidade (%)	0,00	0,37	0,57	1,06	0,00	6,16
Índice exp. (%)	0,00	2,82	3,65	5,55	0,00	25,04
pH (H2O)	6,7	7,0	7,3	7,4	7,5	7,5
pH (KCl)	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,2
Mat. orgânica (%)	1,57	2,03	1,16	----	----	----
C orgânico (%)	0,91	1,18	0,67	----	----	----
N total (%)	0,14	0,14	----	----	----	----
Ca troca (me/100g)	6,07	6,14	6,39	6,91	6,31	19,00
Mg //	3,40	3,20	4,30	5,40	3,00	7,50
K //	0,28	0,48	0,13	0,10	0,29	0,15
Na //	0,09	0,09	0,07	0,08	0,09	0,21
H //	7,70	9,86	13,15	10,38	6,06	11,76
Acidez	0,15	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15
Cat. troca (me/100g)	9,84	9,91	10,89	12,49	9,69	26,86
Cap. troca (me/100g)	9,99	10,06	10,99	12,64	9,84	27,01
Grau satur. (%)	98,5	98,51	99,09	98,81	98,48	99,44
P extraível (ppm)	181 A	112 A	27 B	----	----	----
K //	166 A	128 A	80 Med	----	----	----
P total (%)	43	65	26	----	----	----
Fe livre (%)	2,70	2,94	2,81	2,65	1,49	0,05
Al total (ppm)	0,14	0,14	0,10	0,14	0,14	0,14

* - lenta; ** - mod. Lenta; *** - rápida; **** - mod. Rápida

7.2 – Recomendação de fertilização

Quadro A.7.2 – Análise sumária e recomendação de fertilização

Ano	Bloco	Textura	% MO	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	P (ppm P ₂ O ₅)	K (ppm K ₂ O)
1996	I	Média	1,08	6,0	5,1	89 M	122 A
	II	//	1,05	6,1	5,0	117 A	142 A
	III	//	0,98	6,4	5,3	100 A	120 A
Recomendação (kg ha ⁻¹)						60	90
1997	I	Média	0,82	6,0	4,4	43 B	95 M
	II	//	0,85	6,2	4,5	50 M	104 A
	III	//	0,92	5,8	4,1	46 B	105 A
Recomendação (kg ha ⁻¹)						120	150
1998	I	Média	1,96	6,3	5,1	153 A*	156 A
	II	//	1,75	6,5	5,5	110 A**	208 MA
	III	//	1,52	6,6	5,5	73 M***	177 A
Recomendação (kg ha ⁻¹)						*50;**60;***70	80

7.3 – Determinações preliminares nas terras destinadas a testes laboratoriais

Quadro A.7.3.1 – Registos da análise mecânica

Ano	Bloco	Prof. (cm)	El gros (%)	Ar gros (%)	Ar fina (%)	Limo (%)	Argila (%)	Textura
1996	I	0-30	23,33	18,4	49,6	19,7	12,3	Fr-arenoso
	I	30-60	19,15	20,5	50,0	17,2	12,3	//
	II	0-30	22,74	19,4	53,0	16,6	11,0	//
	II	30-60	20,02	12,1	56,6	18,6	12,7	//
	III	0-30	25,76	15,0	56,8	17,2	11,0	//
	III	30-60	18,94	12,0	54,0	19,7	14,3	//
1997		0-14		20,89	51,77	14,30	13,04	Fr-arenoso
		14-30		19,89	52,82	13,77	13,52	//
		30-60		20,26	51,73	13,61	14,40	//
1998		0-14	22,3	18,28	55,74	13,57	12,41	Fr-arenoso
		14-30	24,0	19,31	55,54	12,99	12,16	//
		30-60	33,2	23,11	48,74	12,54	15,61	//

Quadro A.7.3.2 - Outras determinações físico/químicas

Ano	pF 2,0	pF 2,7	pF 4,2	Dap	% C*	pH(H ₂ O)	pH(KCl)
1997	18,7	16,3	9,2	1,10	1,03	6,2	5,2
	18,3	16,1	8,7	1,10	1,05	6,5	5,4
	20,0	15,8	8,2	1,28	0,51	6,8	5,4
1998	16,8	14,5	8,1	1,24	1,19	6,3	5,3
	17,2	14,8	8,3	1,21	1,17	6,3	5,4
	18,4	15,2	8,8	1,10	0,60	6,6	5,5

* Carbono facilmente oxidável (método Walkley-Black)

7.4 – Caracterização fisiológica dos tubérculos/semente

Quadro A.7.4 – Estado de abrolhamento dos tubérculos na data de plantação

Tubérculos	1996		1997		1998	
	média	d. p.	média	d. p.	média	d. p.
Peso fresco (g)	55,15	14,23	93,40	20,42	97,12	28,01
Altura (mm)	6,40	1,01	7,30	0,94	7,87	1,50
Diâmetro maior (mm)	3,27	0,34	5,20	0,49	5,04	0,55
Diâmetro menor (mm)			3,86	0,46	3,90	0,53
Abrolhamento						
Nº total olhos			9,10	2,02	9,7	1,80
Nº olhos c/ sinais abrol.	8,06	1,93	6,93	2,08	7,9	2,40
Nº olhos c/ brolhos (>3mm)	4,10	1,40	4,93	1,87	3,9	1,36
Nº tot. brol. (incluindo ramif.)			15,23	6,18	8,83	3,61
Comp. total brolhos (mm)			102,60	42,19		
Comp. brolho + comprido (mm)	2,20	0,46	16,47	5,66	21,53	5,95
Nº brolhos apicais			6,20	5,66	2,87	1,31
Comp. total brolhos apicais (mm)			43,87	35,15		
Comp. brol. apical + comp.(mm)			11,03	6,97		
Distribuição dos brolhos			regular/ distribuídos*		na metade de cima**	

* valores entre 2 e 4 da escala: 1 - polo apical; 2 - na metade de cima; 3 - regularmente distribuídos; 4 - na metade de baixo; e 5 - polo basal; 6 - polo basal mais apical.

** valores entre 1 e 3 da mesma escala.

7.5 – Caracterização dos correctivos orgânicos

Quadro A. 7.5 – Determinações preliminares nos estrumes utilizados nos ensaios

	E. aviário			E. bovino			RSU		
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998
M. seca (%)	59	90	72	51	73	27	45	52	52
M. org. (g kg ⁻¹)	32,3	41,9	39,3	23,9	29,2	36,9	42,9	43,6	29,1
N Kjehl. (g kg ⁻¹)	39,9	35,2	30,1	11,8	16,6	19,4	17,3	11,9	14,0
N-NH ₄ ⁺ (g kg ⁻¹)	1,431	1,891	0,283	0,119	0,152	0,122	0,057	0,691	0,164
N-NO ₃ ⁻ (g kg ⁻¹)	0,006	0,429	0,027	0,204	0,413	0,995	0,180	0,027	0,019
Ca (g kg ⁻¹)	71,0	25,7	30,3	23,9	25,0	21,7	30,3	28,5	15,6
Mg (g kg ⁻¹)	5,4	7,6	4,3	4,3	3,7	1,6	2,9	3,6	3,3
K (g kg ⁻¹)	16,0	18,0	20,0	7,4	4,8	15,0	4,6	4,2	5,8
P (g kg ⁻¹)	15,2	11,8	11,0	3,9	6,0	6,4	4,8	5,4	5,1
S (g kg ⁻¹)	3,5	4,3	3,5	2,1	3,0	3,1	2,7	2,0	2,1
Fe (g kg ⁻¹)	1,8	4,9	2,7	38,7	26,7	15,7	11,9	8,7	7,6
Na (g kg ⁻¹)	4,0	4,1	5,8	1,7	1,4	3,0	8,0	4,8	6,4
Zn (mg kg ⁻¹)	248	260	270	178	160	150	620	750	620
Mn (mg kg ⁻¹)	237	300	257	796	792	494	208	166	171
Cu (mg kg ⁻¹)	40	55	60	114	74	58	343	322	278

7.6 – Tratamentos fitossanitários

Quadro A.7.6 – Calendarização dos tratamentos fitossanitários e produtos utilizados

1996

Data	Objectivo	Sub. activa	Dose	formulação	Desig. comercial
7 Jun	infestantes	metribuzina (35 %, p/p)	2 kg/ha	ag. dis. água	Sencor Ultra D (Bayer)
	míldio	cimoxanil (4,5%, p/p) + propinebe (58%, p/p)	300 g/hl	pó molhável	Milraz (Bayer)
19 Jun	escaravelho	carbaril (50%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Permutex (Permutadora)
	míldio	metalaxil (10%, p/p) + N-(triclorometiltio)-ftalimida (40%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Ridomil Combi 50 (Ciba Geigy)
1 Jul	escaravelho	carbaril (50%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Permutex (Permutadora)
	míldio	cimoxanil (4,5%, p/p) + propinebe (58%, p/p)	300 g/hl	pó molhável	Milraz (Bayer)
10 Jul	escaravelho	carbaril (50%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Permutex (Permutadora)
	míldio	metalaxil (10%, p/p) + N-(triclorometiltio)-ftalimida (40%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Ridomil Combi 50 (Ciba Geigy)
23 Jul	escaravelho	carbaril (50%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Permutex (Permutadora)
27 Ago	escaravelho	carbaril (50%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Permutex (Permutadora)

1997

Data	Objectivo	Sub. activa	Dose	formulação	Desig. comercial
9 Jun	infestantes	metribuzina (35 %, p/p)	2 kg/ha	ag. dis. água	Sencor Ultra D (Bayer)
12 Jun	míldio	mancozebe (64%, p/p) + metalaxil (8%, p/p)	250g/hl	pó molhável	Ridomil MZ 72 (Ciba Geigy)
18 Jun	míldio	mancozebe (64%, p/p) + metalaxil (8%, p/p)	250g/hl	pó molhável	Ridomil MZ 72 (Ciba Geigy)
	escaravelho	clorpirifos (40,8 %, p/p)	200ml/hl	conc. p/ emul.	Dursban 4 (Agroquisa)
27 Jun	míldio	mancozebe (64%, p/p) + metalaxil (8%, p/p)	250g/hl	pó molhável	Ridomil MZ 72 (Ciba Geigy)
	escaravelho	clorpirifos (40,8 %, p/p)	200ml/hl	conc. p/ emul.	Dursban 4 (Agroquisa)
11 Jul	míldio	mancozebe (64%, p/p) + metalaxil (8%, p/p)	250g/hl	pó molhável	Ridomil MZ 72 (Ciba Geigy)
25 Jul	míldio	mancozebe (80%, p/p)	200g/hl	pó molhável	Kor 80 (AgrEvo)
	escaravelho	clorpirifos (40,8 %, p/p)	200ml/hl	conc. p/ emul.	Dursban 4 (Agroquisa)
21 Ago	míldio	mancozebe (80%, p/p)	200g/hl	pó molhável	Kor 80 (AgrEvo)
	escaravelho	clorpirifos (40,8 %, p/p)	200ml/hl	conc. p/ emul.	Dursban 4 (Agroquisa)

1998

Data	Objectivo	Sub. activa	Dose	formulação	Desig. comercial
3 Jun	infestantes	metribuzina (35 %, p/p)	2 kg/ha	agl. dis. água	Sencor Ultra D (Bayer)
15 Jun	míldio	mancozebe (64%, p/p) + metalaxil (8%, p/p)	250 g/hl	pó molhável	Ridomil MZ 72 (Ciba Geigy)
	escaravelho	clorpirifos (40,8 %, p/p)	200 ml/hl	conc. p/ emul.	Dursban 4 (Agroquisa)
25 Jun	infestantes	fluazifope-P-butilo (13%, p/p)	2 l/ha	conc. p/ emul.	Fusilade X2 (Zeneca, Agro)
25 Jun	míldio	cimoxanil (3%, p/p) + folpete (12,5%, p/p) + mancozebe (12,5%, p/p)	400 g/hl	pó molhável	Miltrat (AgrEvo)
6 Jul	míldio	cimoxanil (3%, p/p) + folpete (12,5%, p/p) + mancozebe (12,5%, p/p)	400 g/hl	pó molhável	Miltrat (AgrEvo)

6 Jul	escaravelho	lambda-cialotrina (5,5%, p/p)	40 ml/hl	con. p/ emul.	Karate (Zeneca, Agro)
21 Jul	mildio	mancozebe (80%, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Kor 80 (AgrEvo)
	escaravelho	clorpirifos (40,8 %, p/p)	200 ml/hl	con. p/ emul.	Dursban 4 (Agroquisa)
16 Ago	mildio	mancozebe (80 %, p/p)	200 g/hl	pó molhável	Dithane M45 (Permutadora)
	escaravelho	lambda-cialotrina (5,5%, p/p)	40 ml/hl	con. p/ emul.	Karate (Zeneca, Agro)

7.7 – Rega

Quadro A.7.7.1– Datas e dotações de rega

1996		1997		1998	
Data	Dotação (mm)	Data	Dotação (mm)	Data	Dotação (mm)
6 Jun	05	26 Jun	15	19 Jun	15
14 Jun	25	30 Jun	20	24 Jun	22
29 Jun	25	5 Jul	20	29 Jun	20
3 Jul	15	10 Jul	20	7 Jul	18
6 Jul	10	14 Jul	20	13 Jul	18
9 Jul	15	20 Jul	10	18 Jul	18
12 Jul	25	24 Jul	15	23 Jul	20
15 Jul	15	28 Jul	15	27 Jul	15
18 Jul	20	31 Jul	18	31 Jul	18
22 Jul	20	4 Ago	18	4 Ago	15
26 Jul	20	8 Ago	10	9 Ago	18
30 Jul	20	12 Ago	6	24 Ago	20
3 Ago	20	18 Ago	20	3 Set	20
9 Ago	20	25 Ago	12		
14 Ago	20	3 Set	18		
20 ago	20	9 Set	18		
25 Ago	20				
31 Ago	15				
6 Set	15				
13 Set	15				
Total	360		255		222

Quadro A.7.7.2 – Registos de pluviometria (mm) durante a rega em pontos aleatórios nos ensaios

1997	Leitura 1	118; 113; 50; 126; 124; 138; 97; 54; 96; 134; 86; 54; 74; 114; 92; 68; 59; 78; 116; 98; 64; 80; 72; 56; 96; 117; 56; 60
1998	Leitura 2	120; 104; 120; 106; 76; 74; 100; 80; 83; 58; 60; 90; 112; 76; 60; 76
	Leitura 3	190; 110; 140; 200; 100; 100; 100; 98; 88; 130; 190; 160; 200; 200; 120; 150

7.8 - Registos das observações fenológicas

Quadro A.7.8.1 - Registos de 1997 (14 DAE)

N (fundo)	Bloco	Tx cob. (1-10)	Alt. (cm)	Nº fol. exp.	Veg.	Flor.
Nf0	I	1.2	7.4	5.9	2	0
	II	1.8	9.2	7.1	2	0
	III	0.8	6.7	6.3	2	0
Nf50	I	2.7	12.6	7.8	3	0
	II	2.5	10.3	7.8	3	0
	III	3.0	12.6	8.3	4	0
Nf100	I	3.2	12.6	8.4	4	0
	II	3.0	13.6	9.1	4	0
	III	2.7	9.4	6.7	3	0
Nf200	I	3.2	11.8	8.0	3	0
	II	3.2	11.4	7.8	4	0
	III	3.4	10.8	7.8	3	0
Nf300	I	2.8	12.5	7.5	4	0
	II	2.5	11.1	8.3	4	0
	III	3.0	9.2	7.4	3	0
Eav	I	2.2	10.2	7.4	2	0
	II	2.1	10.7	6.8	2	0
	III	1.3	8.5	6.3	2	0
Ebo	I	1.3	8.3	6.2	2	0
	II	1.5	8.6	6.4	2	0
	III	1.0	7.2	6.8	2	0
RSU	I	0.9	6.1	5.3	2	0
	II	1.8	10.0	7.5	2	0
	III	0.7	6.1	5.4	2	0

Legenda

Vegetação:

- 0 - emergência
- 2 - plantas isoladas na linha
- 4 - plantas tocam-se na linha
- 6 - plantas tocam-se na entre-linha
- 8 - taxa de cobertura superior a 80%
- 10 - amontoa a descoberto devido à acama
- 12 - morte das plantas

Floração:

- 0 - ausência botões florais
- 1 - botões verdes visíveis
- 2 - início da floração
- 3 - plena fl (+ de 50% pl com flores visíveis)
- 4 - menos de 50% das plantas ainda têm flores
- 5 - abscisão completa

Evolução da rama:

- 9 - caules e folhas verdes
- 7 - caul verdes e fol começam a amarelecer
- 5 - caul ainda verdes, metade das fol mortas
- 3 - caul começam a amarel, todas as fol mort
- 1 - caules e folhas completamente mortas

Quadro A.7.8.2 - Registos de 1997 (27 DAE)

N (fundo)	Bloco	N (cob.)	Tx cob. (1-10)	Alt. (cm)	Nº fol. exp.	Veg.	Flor.
Nf0	I	Nc0	3.0	17.3	9.4	2	1
		Nc25					1
		Nc50	4.5	20.9	9.2	4	1
		Nc100					1
		Nc200	5.0	23.3	9.6	4	1
		Nc0	3.8	25.8	10.4	4	1
	II	Nc25					1
		Nc50	4.8	26.6	11.2	4	1
		Nc100					1
		Nc200	7.3	31.2	10.8	5	1
		Nc0	1.5	14.6	8.0	2	1
		Nc25					1
III	Nc50	3.8	22.3	10.2	4	1	
	Nc100					1	
	Nc200	3.3	20.1	10.6	4	1	

Quadro A.7.8.3 - Registos de 1997 (41 DAE)

Tx cob. (1-10)	Alt. (cm)	Nº fol. exp.	Veg.	Flor.	Evol. rama
3.3	31.0	12.5	4	3	9
5.0			4+	3	9
8.0	48.8	15.0	8	3	9
10.0			8	3	9
10.0	52.5	15.5	8	3	9
5.0	44.5	15.0	5	3	9
8.0			8	3	9
10.0	54.8	14.0	8	3	9
10.0			8	3	9
10.0	64.5	16.0	8	3	9
2.0	23.0	10.0	4	3	9
5.0			4+	3	9
9.0	44.5	15.5	8	3	9
10.0			8	3	9
10.0	48.5	15.0	8	3	9

		Nc0	5.3	31.9	12.0	4	1	5.0	47.8	15.0	5	3	9
		Nc25					1	9.0			8	3	9
	I	Nc50	5.3	27.0	10.0	4	1	9.0	51.0	14.5	8	3	9
		Nc100					1	10.0			8	3	9
		Nc200	7.8	32.7	11.8	5	1	10.0	62.8	14.0	8	3	9
Nf50		Nc0	4.8	27.6	9.8	4	1	7.0	48.3	14.5	5	3	9
		Nc25					1	9.0			8	3	9
	II	Nc50	5.5	26.2	10.6	4	1	10.0	43.5	14.0	8	3	9
		Nc100					1	10.0			8	3	9
		Nc200	7.0	32.9	11.4	5	1	10.0	67.5	17.5	8	3	9
		Nc0	6.3	29.2	10.6	4	1	9.0	57.0	15.5	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	III	Nc50	5.8	30.8	11.8	5	1	10.0	57.5	15.5	8	3	9
		Nc100					1	10.0			8	3	9
		Nc200	6.8	32.9	11.2	5	1	10.0	54.8	15.5	8	3	9
		Nc0	7.5	39.1	11.4	5	1	10.0	58.0	16.0	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	I	Nc50					1	10.0	54.3	16.0	8	3	9
		Nc100					1	10.0			8	3	9
		Nc200					1	10.0	67.5	16.5	8	3	9
Nf100		Nc0	7.8	39.8	12.4	5	1	10.0	62.0	16.5	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	II	Nc50					1	10.0	57.8	14.5	8	3	9
		Nc100					1	10.0			8	3	9
		Nc200					1	10.0	65.5	17.0	8	3	9
		Nc0	5.0	28.2	10.0	4	1	8.0	48.0	14.5	6	3	9
		Nc25					1	9.0			6	3	9
	III	Nc50					1	10.0	45.0	13.0	8	3	9
		Nc100					1	10.0			8	3	9
		Nc200					1	10.0	51.0	15.5	8	3	9
		Nc0	6.3	33.9	10.8	5	1	10.0	57.0	14.0	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	I	Nc50					1	10.0			8	3	9
		Nc100					1	10.0	53.5	15.0	8	3	9
		Nc200					1				3	9	
Nf200		Nc0	6.8	35.3	11.4	5	1	10.0	60.8	15.0	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	II	Nc50					1	10.0			8	3	9
		Nc100					1	10.0	60.0	15.5	8	3	9
		Nc200					1				3	9	
		Nc0	7.0	35.9	12.4	6	1	10.0	53.0	15.0	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	III	Nc50					1	10.0			8	3	9
		Nc100					1	10.0	62.0	14.0	8	3	9
		Nc200					1				3	9	
		Nc0	8.0	42.1	11.6	6	1	10.0	56.4	15.5	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	I	Nc50					1	10.0			8	3	9
		Nc100					1	10.0	68.5	16.5	8	3	9
		Nc200					1				3	9	
Nf300		Nc0	6.8	37.6	12.2	5	1	10.0	64.0	17.0	8	3	9
		Nc25					1	10.0			8	3	9
	II	Nc50					1	10.0			8	3	9
		Nc100					1	10.0	63.0	17.5	8	3	9
		Nc200					1				3	9	

Nf300	III	Nc0	8.0	34.1	11.0	6	1	10.0	59.5	14.5	8	3	9	
		Nc25						1	10.0			8	3	9
		Nc50						1	10.0			8	3	9
		Nc100						1	10.0	63.5	15.0	8	3	9
		Nc200						1					3	9
Eav	I	Nc0	5.3	30.5	9.6	4	1	5.0	50.0	14.5	5	3	9	
		Nc25						1	8.0			8	3	9
		Nc50	5.3	30.6	11.0	4	1	10.0	47.0	15.0	8	3	9	
		Nc100						1	10.0			8	3	9
		Nc200	6.5	35.9	11.2	5	1	10.0	65.0	15.0	8	3	9	
	II	Nc0	4.3	23.6	10.4	4	1	5.0	43.0	14.0	5	3	9	
		Nc25						1	10.0			8	3	9
		Nc50	6.5	29.8	10.4	4	1	10.0	56.0	12.5	8	3	9	
		Nc100						1	10.0			8	3	9
		Nc200	8.0	33.7	11.6	5	1	10.0	60.5	14.0	8	3	9	
III	Nc0	3.0	18.8	9.2	3	1	4.0	39.0	14.5	4	3	9		
	Nc25						1	5.0			5	3	9	
	Nc50	3.8	19.7	10.2	4	1	7.0	44.3	15.5	5+	3	9		
	Nc100						1	9.0			8	3	9	
	Nc200	5.8	22.0	10.8	4	1	10.0	49.3	15.5	8	3	9		
I	Nc0	3.0	19.4	9.4	3	1	3.3	31.0	13.5	4	3	9		
	Nc25						1	5.0			4+	3	9	
	Nc50	3.8	22.0	9.6	4	1	8.0	46.5	13.5	8	3	9		
	Nc100						1	10.0			8	3	9	
	Nc200	4.0	21.8	10.0	4	1	9.0	46.3	14.0	8	3	9		
II	Nc0	2.5			3	1	3.3	35.8	13.5	4	3	9		
	Nc25						1	6.0			5	3	9	
	Nc50	5.0	26.4	10.0	4	1	9.0	50.0	13.0	8	3	9		
	Nc100						1	9.0			8	3	9	
	Nc200	5.0	22.6	9.8	4	1	10.0	53.0	15.5	8	3	9		
III	Nc0	2.0	17.6	9.2	2	1	4.0	31.3	10.5	4	3	9		
	Nc25						1	5.0			4+	3	9	
	Nc50	3.3	15.9	9.2	3	1	7.0	39.0	12.5	6	3	9		
	Nc100						1	8.0			8	3	9	
	Nc200	3.8	17.6	9.6	4	1	10.0	44.3	13.0	8	3	9		
I	Nc0	2.3	15.3	7.6	2	1	3.3	32.8	13.0	4	3	9		
	Nc25						1	5.0			5	3	9	
	Nc50	4.3	16.4	8.2	4	1	8.0	46.0	12.5	8	3	9		
	Nc100						1	9.0			8	3	9	
	Nc200	4.0	21.2	8.6	4	1	10.0	51.3	14.5	8	3	9		
II	Nc0	4.3	28.0	11.2	4	1	6.0	43.5	14.5	6	3	9		
	Nc25						1	10.0			8	3	9	
	Nc50	5.3	27.7	11.2	5	1	10.0	54.5	15.0	8	3	9		
	Nc100						1	10.0			8	3	9	
	Nc200	6.5	30.7	12.2	5	1	10.0	62.0	15.5	8	3	9		
III	Nc0	2.1	16.0	9.0	3	1	4.0	28.5	12.0	4	3	9		
	Nc25						1	5.0			4	3	9	
	Nc50	3.3	16.4	8.6	4	1	6.0	39.8	13.5	5	3	9		
	Nc100						1	9.0			8	3	9	
	Nc200	3.5	18.7	9.6	4	1	10.0	48.0	15.0	8	3	9		

7.9 - Registos das determinações na colheita

Quadro A.7.9.1 - Ensaio de 1996

N (fundo)	N (cob.)	Nº tubérculos calibre (mm)		Peso fresco (g/6 pl.) calibre (mm)		MS tub. (%)	Defeitos externos				Densímetro G. esp. % MS	N tub. (%)						
		<35	35-65 >35	<35	35-65 >65		Abrol. n°	Recresc. n°	Esverd. n°	Sarna (*)								
I	Nc0	20	65	2	257.0	5940.0	651.0	21.7	0	0.0	2	314.5	1	25.1	4	1.085	21.0	1.084
	Nc25	29	48	6	454.3	4580.1	1417.4	21.5	0	0.0	3	130.2	2	61.6	3	1.082	20.3	1.068
	Nc50	18	66	2	218.8	6568.5	475.8	23.3	0	0.0	2	76.1	0	0.0	5	1.087	21.4	0.915
	Nc100	19	61	5	284.3	6447.3	1499.4	20.6	0	0.0	4	612.1	2	131.1	5	1.083	20.7	1.232
	Nc200	16	51	6	179.3	4138.0	1994.6	23.3	0	0.0	0	0.0	1	83.6	3	1.081	20.2	1.183
	Nc0	12	30	7	181.7	3682.6	1762.3	23.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.088	22.6	1.063
II	Nc25	3	28	12	70.7	2899.6	3401.9	22.6	0	0.0	0	0.0	1	15.6	5	1.087	21.4	1.166
	Nc50	11	31	11	192.3	3130.1	3263.9	23.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.089	22.0	1.129
	Nc100	12	35	14	176.6	3098.0	3790.6	20.2	0	0.0	1	131.0	1	131.8	5	1.083	20.6	1.227
	Nc200	8	38	13	132.6	3669.7	3868.4	22.3	0	0.0	1	67.2	0	0.0	4	1.088	21.6	1.293
	Nc0	9	37	5	145.6	3975.1	1487.6	20.9	0	0.0	2	298.1	3	94.7	1	1.087	21.4	0.971
	Nc25	15	62	1	175.9	5433.1	348.5	21.8	0	0.0	0	0.0	3	66.6	2	1.085	21.2	1.064
III	Nc50	6	42	8	108.7	3942.0	2168.3	22.4	0	0.0	1	73.4	0	0.0	2	1.087	21.6	1.300
	Nc100	10	58	4	167.5	5350.0	919.6	21.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	1.085	21.2	1.124
	Nc200	13	55	6	201.0	5385.1	1317.7	22.7	0	0.0	1	97.8	0	0.0	2	1.087	21.6	1.251
	Nc0	3	39	7	69.2	4506.4	2034.7	24.0	0	0.0	0	0.0	1	117.2	2	1.086	23.3	1.073
	Nc25	13	65	5	173.8	5424.5	1360.0	24.8	0	0.0	1	35.6	0	0.0	3	1.096	23.3	1.117
	Nc50	16	68	1	218.5	6200.8	295.7	24.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.092	22.6	1.073
I	Nc100	22	86	1	339.2	6992.2	277.8	23.5	0	0.0	2	73.4	0	0.0	2	1.093	22.7	1.337
	Nc200	11	44	9	193.3	4410.4	2902.3	22.2	0	0.0	2	266.7	1	120.4	4	1.090	22.0	1.748
	Nc0	11	25	11	208.5	2019.7	3163.5	23.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.084	20.9	1.123
	Nc25	10	42	7	125.5	4598.6	1756.0	22.7	0	0.0	0	0.0	1	47.0	5	1.086	21.2	1.359
	Nc50	6	37	11	95.6	3909.3	3257.4	22.8	0	0.0	0	0.0	1	114.9	5	1.086	21.4	1.441
	Nc100	10	41	7	160.4	5411.4	2249.7	24.0	0	0.0	0	0.0	1	37.4	3	1.087	21.4	1.463
Nc200	11	49	10	218.1	4772.8	2807.7	23.5	0	0.0	0	0.0	3	178.5	4	1.084	20.8	1.551	

	Nc0	74	201	0	1560	17010	0	15.5	0	0	2	230	0	0	0	0	0	1.084	20.8	1.413
	Nc25	77	152	3	1210	14290	1520	21.0	0	0	7	540	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.539
	Nc50	68	194	3	1540	17300	1000	20.3	0	0	3	510	2	210	0	0	0	1.081	20.2	1.474
III	Nc100	70	180	5	1550	16560	2070	22.8	0	0	4	540	0	0	0	0	0	1.083	20.7	1.928
	Nc0	100	185	0	1800	14080	0	21.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.078	19.5	1.320
	Nc25	72	160	5	1550	14420	1930	22.4	0	0	2	400	0	0	0	0	0	1.083	20.6	1.314
I	Nc50	75	194	6	1420	17400	2100	19.6	0	0	3	280	0	0	0	0	0	1.082	20.5	1.166
	Nc100	66	168	10	1550	15610	3200	20.7	0	0	3	360	0	0	0	0	0	1.082	20.4	1.304
	Nc200	111	194	5	2320	19430	2000	21.7	0	0	3	540	0	0	0	0	0	1.079	19.8	1.364
	Nc0	68	149	2	1500	14670	900	20.4	0	0	1	120	0	0	0	0	0	1.086	21.9	1.096
	Nc25	117	186	6	2500	17170	2100	20.5	0	0	1	100	0	0	0	0	0	1.081	20.2	1.156
II	Nc50	68	209	6	1500	17160	2200	20.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.077	19.4	0.980
	Nc100	76	172	11	1400	15920	3200	20.5	0	0	4	300	0	0	0	0	0	1.076	19.2	1.254
	Nc200	56	230	6	1500	21360	2150	21.1	0	0	5	810	2	200	0	0	0	1.079	19.9	1.654
	Nc0	54	175	1	1350	9440	560	20.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.076	19.2	1.194
	Nc25	46	116	0	1300	9410	0	20.2	0	0	2	330	0	0	0	0	0	1.076	19.1	1.249
III	Nc50	114	138	3	2030	10290	1020	20.4	0	0	2	300	0	0	0	0	0	1.075	18.8	1.172
	Nc100	79	156	3	1570	13610	1150	21.0	0	0	2	240	0	0	0	0	0	1.080	20.1	1.364
	Nc200	72	182	8	1600	16310	2300	21.7	0	0	10	1040	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.364
	Nc0	97	159	0	1840	11240	0	19.7	0	0	7	1020	0	0	0	0	0	1.076	19.2	1.046
	Nc25	116	148	0	2450	12100	0	20.5	0	0	5	390	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.227
I	Nc50	70	148	7	1460	14800	2350	19.9	0	0	5	420	0	0	0	0	0	1.078	19.6	0.958
	Nc100	91	169	6	1920	16860	2600	19.7	0	0	12	1640	0	0	0	0	0	1.077	19.3	1.474
	Nc200	64	165	5	1450	16140	1650	21.0	0	0	9	600	0	0	0	0	0	1.081	20.2	1.221
	Nc0	59	157	3	1320	13280	1100	19.3	0	0	3	520	0	0	0	0	0	1.080	19.9	1.007
	Nc25	53	157	1	1200	14630	670	20.6	0	0	3	390	0	0	0	0	0	1.081	20.2	1.046
II	Nc50	126	181	2	2540	17640	960	19.0	0	0	2	200	0	0	0	0	0	1.081	20.1	1.232
	Nc100	88	163	14	1530	15910	3900	6.9	0	0	4	900	0	0	0	0	0	1.076	19.1	1.030
	Nc200	93	192	8	2050	17580	3100	22.6	0	0	7	900	0	0	0	0	0	1.081	20.3	1.287
	Nc0	252	179	0	2800	7795	0	17.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.069	17.8	1.068
	Nc25	86	102	2	2700	7795	300	21.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.073	18.4	1.000
III	Nc50	89	145	7	1800	14520	2340	22.1	1	65	6	445	0	0	0	0	0	1.078	19.5	1.408
	Nc100	75	146	4	1440	14320	2000	21.4	0	0	8	665	0	0	0	0	0	1.078	19.6	1.408

	Nc0	108	121	0	1050	10500	0	19.0	0	0	2	120	0	0	0	0	0	0	0	1.078	19.5	1.134
	Nc25	65	145	0	1700	12660	0	19.4	0	0	2	170	3	400	0	0	0	0	0	1.081	20.1	0.947
I	Nc50	60	146	1	1260	13420	700	19.1	0	0	2	290	0	0	0	0	0	0	0	1.079	19.7	1.030
	Nc100	57	153	4	1570	14900	1400	21.3	0	0	4	420	0	0	0	0	0	0	0	1.081	20.2	1.506
	Nc200	57	176	12	1460	18270	4000	22.6	0	0	6	600	0	0	0	0	0	0	0	1.080	19.9	1.430
	Nc0	63	161	0	1450	15310	0	20.7	0	0	1	60	0	0	0	0	0	0	0	1.075	18.8	1.200
	Nc25	53	218	5	1220	17910	1700	19.7	0	0	3	260	0	0	0	0	0	0	0	1.077	19.4	1.331
II	Nc50	69	176	1	1470	15450	620	19.9	0	0	2	240	1	60	0	0	0	0	0	1.076	19.1	1.244
	Nc100	54	201	7	1270	17310	2000	20.4	0	0	1	120	3	210	0	0	0	0	0	1.071	18.0	1.249
	Nc200	121	186	2	1960	16060	950	19.7	5	420	5	800	1	40	0	0	0	0	0	1.068	17.9	1.561
	Nc0	107	117	0	2230	9450	0	19.7	0	0	3	150	0	0	0	0	0	0	0	1.068	17.2	1.194
	Nc25	98	101	2	1690	8060	730	20.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.073	18.4	1.161
III	Nc50	58	136	2	1320	11610	720	20.7	0	0	6	550	0	0	0	0	0	0	0	1.071	18.0	1.199
	Nc100	100	150	5	2060	13260	1800	21.2	0	0	3	200	0	0	0	0	0	0	0	1.077	19.4	1.331
	Nc200	74	145	11	1700	14450	3220	21.7	0	0	2	380	0	0	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.534

* - Interpretação em 3.1.6.4, página 140.

Quadro A.7.9.2 - Ensaio de 1997

N	N	N° tubérc./18 pl.		Peso fres. (g/18 pl.)		MS tub. (%)	Abrol.		Recresc.		Pragas		Esverd.	Sarna (*)	Densimetro	N tub. (%)		
		<35	>35	<35	>65		n°	peso (g)	n°	peso (g)	n°	peso (g)					n°	peso (g)
I	Nc0	68	149	0	1350	10560	0	18.9	0	1	25	0	0	3	1.072	18.3	0.980	
	Nc25	66	146	0	1700	11680	0	20.4	0	1	100	0	0	2	1.077	19.3	1.161	
	Nc50	53	125	3	1460	12630	1320	21.7	0	1	20	0	0	2	1.081	20.2	1.068	
	Nc100	68	161	5	1740	17220	2220	20.6	0	6	910	3	280	2	1.080	20.1	1.194	
	Nc200	71	187	7	1550	17770	2620	21.1	0	5	870	0	0	2	1.080	20.0	1.419	
	Nc0	98	163	0	1750	13560	0	23.6	0	0	0	0	0	4	1.077	19.8	1.232	
	Nc25	113	200	2	2050	15910	750	22.6	0	0	0	0	0	4	1.079	19.9	1.205	
	Nc50	62	157	1	1200	12460	650	21.5	0	0	0	0	0	4	1.068	17.3	1.249	
	Nc100	75	189	7	1420	15980	2620	22.3	0	3	710	0	0	3	1.087	19.4	1.375	
	Nc200	100	195	11	2050	17710	3000	23.5	1	180	3	540	0	0	3	1.082	20.4	1.633
II	Nc0	140	77	0	2520	4670	0	20.2	0	0	0	0	0	4	<1.065	<17	1.523	
	Nc25	60	124	0	1500	10640	0	21.2	0	5	400	0	0	3	1.075	19.0	1.326	
	Nc50	90	143	3	1850	12790	1050	21.9	0	5	600	0	0	3	1.079	19.7	1.370	
	Nc100	80	158	2	1800	14230	840	20.9	0	5	400	0	0	3	1.080	18.8	1.584	
	Nc200	50	137	4	1300	14380	1660	21.3	0	12	2030	0	0	3	1.074	18.8	1.627	
	Nc0	75	161	7	1450	13820	2310	21.4	0	3	330	0	0	3	1.082	20.6	1.046	
	Nc25	85	164	9	1750	15160	2920	21.2	0	2	460	1	200	0	1	1.079	19.9	1.250
	Nc50	57	178	1	1340	16980	620	21.2	0	4	480	0	0	0	2	1.082	20.3	1.199
	Nc100	121	197	7	2240	17410	2300	21.2	0	6	660	0	0	0	2	1.082	20.3	1.364
	Nc200	119	193	7	2550	17770	2700	19.5	0	4	540	2	300	0	3	1.079	19.7	1.281
III	Nc0	190	186	2	3190	14570	1000	19.9	0	10	1350	0	0	5	1.072	18.3	1.194	
	Nc25	101	167	0	2120	12690	0	21.1	0	4	410	0	0	5	<1.065	<17	1.199	
	Nc50	117	197	2	2340	16320	1000	22.0	0	7	950	0	0	4	1.078	19.5	1.342	
	Nc100	86	189	4	1850	16330	1480	20.2	0	7	760	0	0	4	1.074	19.8	1.435	
	Nc200	124	228	0	2520	18840	0	20.8	0	6	1180	0	0	5	<1.065	<17	1.682	
	Nc0	70	165	1	1350	12560	750	21.4	0	1	170	0	0	3	1.081	20.3	1.403	
	Nc25	81	134	2	1850	14310	950	20.0	0	1	40	0	0	2	1.080	20.1	1.161	
	Nc50	65	179	3	1340	14460	1100	19.4	1	170	0	0	0	2	1.081	20.3	1.178	
	Nc100	73	190	4	1500	19500	1600	19.1	0	4	300	0	0	2	1.076	19.1	1.238	
	Nc200	104	191	6	1500	17410	1600	20.4	0	6	460	0	0	2	1.077	19.4	1.858	

	Nc0	6	48	4	113.6	5234.3	1313.1	24.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	1.086	21.3	1.168
	Nc25	13	30	7	236.4	3059.1	2057.6	21.7	0	0.0	5	912.5	0	0.0	3	1.078	19.6	1.272		
III	Nc50	16	31	5	348.1	3762.3	1776.0	21.9	0	0.0	0	0.0	5	342.2	2	1.087	21.4	1.256		
NF50	Nc100	21	35	14	340.8	3481.4	4044.5	22.2	1	16.7	6	1178.4	2	38.7	2	1.079	19.9	1.387		
	Nc200	15	40	8	176.1	4060.3	2716.5	19.5	0	0.0	3	1216.8	1	95.7	1	1.084	20.8	1.651		
	Nc0	2	24	13	42.0	2348.4	3536.6	24.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.090	22.0	1.370		
	Nc25	14	69	5	218.2	7166.6	1320.8	22.7	0	0.0	0	0.0	1	61.5	5	1.088	21.6	1.419		
I	Nc50	19	64	5	557.8	6291.4	1454.1	22.7	0	0.0	0	0.0	1	55.6	4	1.089	22.0	1.238		
	Nc100	20	67	5	316.6	6657.8	1567.6	22.2	0	0.0	1	153.0	3	151.9	5	1.089	21.8	1.320		
	Nc200	19	57	7	302.9	5637.8	2134.1	21.7	0	0.0	2	150.6	0	0.0	4	1.081	20.2	1.611		
	Nc0	7	71	2	92.2	6540.8	533.5	24.3	0	0.0	0	0.0	1	34.0	4	1.083	22.8	1.320		
	Nc25	6	57	3	133.5	5668.0	1029.3	23.0	0	0.0	0	0.0	2	99.8	2	1.092	22.6	1.380		
NF100	Nc50	17	58	3	202.0	4911.0	948.4	21.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	1.089	21.9	1.572		
	Nc100	10	64	8	145.4	6432.1	1983.4	22.5	0	0.0	0	0.0	3	235.8	2	1.086	21.3	1.495		
	Nc200	12	54	9	172.8	5725.1	2546.8	21.5	0	0.0	4	347.0	3	219.2	3	1.082	20.4	1.737		
	Nc0	8	43	9	124.0	4778.5	2220.3	22.5	0	0.0	0	0.0	1	30.8	1	1.087	21.7	1.502		
	Nc25	15	58	3	185.6	5135.8	916.7	24.0	0	0.0	1	68.3	0	0.0	2	1.085	21.0	1.585		
III	Nc50	8	47	3	185.0	5072.0	882.7	21.0	0	0.0	1	233.9	0	0.0	1	1.086	21.3	1.640		
	Nc100	12	67	5	154.8	6869.4	1382.8	24.2	0	0.0	0	0.0	1	85.6	2	1.090	22.1	1.333		
	Nc200	6	56	7	85.6	5809.2	1614.5	22.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	1.086	21.3	1.579		
	Nc0	9	58	5	98.1	5831.5	1207.6	23.5	0	0.0	2	189.6	0	0.0	3	1.091	22.3	1.627		
	Nc25	13	71	5	217.6	6299.1	947.3	23.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	1.091	22.3	1.518		
I	Nc50	19	58	9	297.6	4990.6	2210.0	23.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.091	22.3	1.495		
	Nc100	32	63	6	458.0	6232.1	1367.3	24.3	0	0.0	2	141.8	0	0.0	3	1.094	23.0	1.485		
	Nc0	11	39	9	185.0	4180.9	2485.1	21.2	0	0.0	1	127.2	1	53.1	4	1.081	20.2	1.380		
	Nc25	7	29	17	90.1	2741.6	5045.7	21.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.085	21.1	1.567		
NF200	Nc50	9	55	4	165.2	5307.9	1237.8	22.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.090	22.1	1.841		
	Nc100	12	58	9	247.6	5689.4	2514.9	19.6	0	0.0	0	0.0	2	102.2	5	1.086	21.3	1.835		
	Nc0	9	35	10	119.7	3520.6	2664.4	22.3	0	0.0	0	0.0	1	49.7	4	1.086	21.3	1.766		
	Nc25	8	49	5	96.7	5001.4	1432.6	22.8	0	0.0	0	0.0	1	16.1	4	1.089	21.9	1.519		
III	Nc50	8	24	13	132.9	2787.2	3508.1	23.9	0	0.0	1	227.7	1	21.2	3	1.087	21.4	1.448		
	Nc100	15	39	13	293.7	3811.3	3710.8	21.9	0	0.0	3	255.0	3	113.6	2	1.088	21.8	1.640		
	Nc0	18	67	3	223.7	6095.2	717.6	22.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.090	22.0	1.633		
	Nc25	9	76	4	148.0	5962.0	1057.9	24.7	0	0.0	1	29.6	0	0.0	3	1.093	22.7	1.551		
NF300	Nc50	16	60	5	226.2	5738.0	1152.6	23.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	1.089	21.9	1.715		
	Nc100	8	40	5	110.0	4286.4	1827.8	23.1	0	0.0	1	45.0	2	174.9	3	1.088	21.6	1.605		

	Nc0	14	64	10	220.4	6539.1	2523.2	21.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	60.2	5	1.082	20.3	1.886
	Nc25	24	52	5	403.0	4837.9	1176.8	20.0	0	0.0	3	162.6	0	0.0	0	0.0	4	1.074	18.8	1.722
II	Nc50	11	48	10	189.3	5083.3	3013.6	20.9	0	0.0	3	546.2	2	193.4	4	1.081	4	1.081	20.2	1.700
	Nc100	20	48	9	336.9	3480.1	2681.4	19.8	0	0.0	1	277.2	0	0.0	0	0.0	1	1.078	19.6	1.990
	Nc0	9	70	5	123.9	7187.3	1199.3	21.6	0	0.0	2	176.7	0	0.0	0	0.0	4	1.088	21.6	1.612
	Nc25	10	55	7	171.9	6074.9	1529.1	23.4	0	0.0	1	129.7	0	0.0	0	0.0	1	1.086	21.2	1.645
III	Nc50	3	49	7	61.9	4684.5	1579.7	20.4	0	0.0	0	0.0	2	132.8	1	1.084	1	1.084	20.8	1.634
	Nc100	16	44	10	199.9	4813.0	3012.7	23.0	0	0.0	12	1218.9	2	197.8	2	1.084	2	1.084	20.9	1.574
	Nc0	10	62	4	117.0	5731.7	1435.6	24.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.089	21.9	0.882
	Nc25	16	46	4	188.3	4863.1	1157.3	23.3	0	0.0	0	0.0	2	122.5	4	1.092	4	1.092	22.6	1.002
I	Nc50	17	63	4	273.7	6500.3	863.3	22.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.093	5	1.093	22.8	1.249
	Nc100	10	54	7	105.3	5127.6	1673.5	22.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.088	5	1.088	21.6	1.254
	Nc200	19	51	9	297.0	5228.2	2706.3	21.0	0	0.0	1	77.2	1	97.0	5	1.090	5	1.090	22.0	1.452
	Nc0	19	72	2	349.5	6238.4	453.8	23.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.094	4	1.094	22.8	1.387
	Nc25	8	67	3	138.7	6604.5	871.8	22.7	0	0.0	1	52.2	0	0.0	3	1.094	3	1.094	23.0	1.120
II	Nc50	13	53	10	232.8	5209.4	2418.7	24.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	1.094	2	1.094	22.9	1.113
	Nc100	16	58	3	229.3	6575.8	690.7	23.6	0	0.0	1	127.7	0	0.0	4	1.094	4	1.094	22.8	1.256
	Nc200	5	21	12	73.0	2626.2	3991.1	22.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.084	5	1.084	20.9	1.459
	Nc0	16	63	5	270.3	4936.2	1001.1	24.2	0	0.0	0	0.0	2	125.4	1	1.093	1	1.093	22.8	1.228
	Nc25	22	53	2	286.9	5217.3	576.4	23.7	0	0.0	2	59.2	0	0.0	2	1.090	2	1.090	22.2	1.344
III	Nc50	12	65	4	253.2	5646.5	1037.9	23.8	0	0.0	1	128.9	1	82.7	1	1.087	1	1.087	21.4	1.284
	Nc100	29	65	1	418.8	5947.1	187.5	22.3	0	0.0	0	0.0	2	121.3	1	1.087	1	1.087	21.6	1.574
	Nc200	11	43	7	162.8	4478.7	1645.4	22.6	0	0.0	0	0.0	3	187.4	1	1.088	1	1.088	21.6	1.535
	Nc0	18	52	2	220.5	4391.5	668.7	22.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.086	5	1.086	21.4	0.783
	Nc25	10	55	5	149.5	4627.1	1625.3	22.2	0	0.0	3	781.5	0	0.0	5	1.087	5	1.087	21.4	0.937
I	Nc50	16	51	4	272.1	5644.6	1281.6	23.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.091	4	1.091	22.3	0.882
	Nc100	8	52	9	103.0	5578.1	2365.2	23.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.087	4	1.087	21.6	1.073
	Nc200	9	43	11	179.9	4869.8	3804.1	22.7	0	0.0	0	0.0	5	149.4	5	1.083	5	1.083	20.7	1.244
	Nc0	16	70	1	260.4	6889.5	224.6	22.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.090	5	1.090	22.1	0.899
	Nc25	16	59	1	274.8	6065.3	345.7	21.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.087	4	1.087	21.4	1.031
II	Nc50	9	45	8	161.9	4723.8	2074.7	22.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.087	4	1.087	21.4	1.179
	Nc100	17	41	10	303.7	4262.2	2886.8	21.0	0	0.0	1	117.3	2	117.3	4	1.088	4	1.088	21.6	1.212
	Nc200	37	58	7	594.3	5097.0	2040.6	21.9	0	0.0	4	279.4	0	0.0	5	1.078	5	1.078	19.7	1.601

	Nc0	17	46	5	365.8	4442.8	1353.5	22.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	112.2	4	1.091	22.3	1.136
	Nc25	18	62	2	283.1	5768.8	690.2	22.9	0	0.0	1	50.6	0	0.0	5	0.0	0	1.086	21.2	1.152
Ebo	Nc50	25	52	3	443.2	5478.9	935.6	23.5	1	15.4	5	784.1	4	172.0	4	1.088	21.6	1.053		
	Nc100	9	55	9	155.0	5903.3	2421.0	22.4	0	0.0	2	191.5	0	0.0	2	1.089	21.9	1.415		
	Nc200	13	39	14	223.3	3980.5	4125.9	20.3	0	0.0	0	0.0	2	162.8	2	1.086	21.3	1.415		
	Nc0	16	44	2	239.7	4974.8	520.7	23.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	1.084	20.8	0.953		
I	Nc25	22	55	6	354.5	5812.3	1405.1	20.7	0	0.0	1	45.8	1	32.7	5	1.083	20.7	0.953		
	Nc50	16	38	9	278.4	3907.0	2646.2	22.7	0	0.0	0	0.0	1	60.8	4	1.081	20.2	1.068		
	Nc100	20	67	5	267.0	5859.0	1220.8	23.9	1	60.8	0	0.0	3	111.1	5	1.085	21.0	1.281		
	Nc200	13	35	13	246.2	3557.0	4088.0	19.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	1.090	22.1	1.199		
	Nc0	14	45	4	259.8	4939.3	1022.7	23.9	0	0.0	2	54.0	2	39.1	5	1.085	21.1	0.998		
RSU	Nc25	9	37	8	186.2	4724.4	2327.1	19.8	0	0.0	0	0.0	2	42.2	5	1.092	21.5	0.949		
	Nc50	6	34	11	113.3	3679.2	2953.3	22.8	0	0.0	1	190.3	1	51.9	4	1.085	21.0	1.004		
	Nc100	16	36	9	270.0	4266.0	2453.7	22.5	0	0.0	1	160.9	0	0.0	4	1.088	21.7	1.321		
	Nc200	9	43	9	88.1	4820.8	3455.8	23.3	0	0.0	2	872.6	0	0.0	5	1.083	20.7	1.387		
	Nc0	12	46	5	218.4	4127.7	1505.2	22.0	0	0.0	2	132.4	2	76.1	2	1.084	20.8	0.954		
III	Nc25	8	47	4	112.6	4308.5	1297.7	23.1	0	0.0	0	0.0	1	43.8	4	1.085	21.0	1.212		
	Nc50	12	55	4	139.0	6257.2	1145.1	21.9	0	0.0	3	701.0	1	142.0	1	1.085	21.2	1.288		
	Nc100	9	40	6	153.3	4720.7	1965.1	22.9	0	0.0	1	75.6	0	0.0	1	1.082	20.4	1.360		
	Nc200	32	51	9	482.5	4905.4	2121.1	23.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	1.083	20.6	1.426		

* - Interpretação em 3.1.6.4, página 140.

Quadro A.7.9.3 - Ensaio de 1998

N	N	Nº tubér./18 pl.		Peso ft. (kg/18 pl.)		MS tub.	Defeitos externos						N tub.	Fritura			
		<35	>35	<35	>65		Abrol.	Recresc.	Pragas	Esverd.	Sarna	Densímetro			(%)	(cor)	
(fundo)	Bloco (cob.)	calibre (mm)	calibre (mm)	calibre (mm)	calibre (mm)	(%)	nº peso (g)	nº peso (g)	nº peso (g)	nº peso (g)	nº peso (g)	nº peso (g)	G. esp. %MS	(%)	(cor)		
I	Ne0	40	162	0	0.35	15.70	0.00	20.3	0	0	0	0	0	1.079	19.7	1.122	6
	Ne25	42	110	5	0.80	12.30	1.30	22.9	0	0	0	0	0	1.079	19.7	1.204	5;6
	Ne50	34	150	5	0.70	17.40	1.10	20.6	0	0	0	0	0	1.078	19.5	1.272	6
	Ne100	39	125	12	0.60	15.70	3.65	19.6	0	0	0	0	0	1.079	19.8	1.340	6
	Ne200	35	106	11	0.70	11.79	4.10	22.2	0	0	0	0	1	1.071	19.4	1.626	6
II	Ne0	74	121	1	1.80	12.20	0.20	20.0	0	0	0	0	0	1.071	18.0	1.187	6
	Ne25	37	160	4	1.10	16.89	1.55	20.9	0	0	0	0	1	1.075	18.8	1.042	6
	Ne50	19	131	4	0.45	17.69	1.60	22.3	0	0	0	0	1	1.076	19.1	1.118	6
	Ne100	37	150	8	0.80	12.30	2.50	19.9	0	0	0	0	0	1.070	18.0	1.518	6
	Ne200	39	128	11	0.95	20.10	3.55	21.2	0	0	0	0	0	1.073	18.4	1.313	6
III	Ne0	56	116	1	1.35	11.20	0.30	20.4	0	0	0	0	0	1.072	18.2	1.144	6;7
	Ne25	27	126	10	0.65	13.70	3.20	21.2	0	1	90	0	0	1.075	18.9	1.144	6
	Ne50	36	128	5	0.75	15.25	1.70	20.0	0	0	0	0	0	1.075	18.9	1.309	6
	Ne100	35	128	7	0.80	14.75	2.60	21.4	0	3	430	0	0	1.077	19.2	1.266	6
	Ne200	43	113	14	1.05	13.70	4.30	20.5	0	1	90	0	0	1.076	19.1	1.694	6
I	Ne0	52	118	5	1.20	13.80	1.50	22.5	0	0	0	0	0	1.086	21.1	1.133	6
	Ne25	38	151	4	0.65	17.00	1.25	21.4	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.248	6
	Ne50	52	168	18	0.85	19.25	5.95	22.2	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.376	6
	Ne100	34	129	19	0.70	14.50	6.80	21.3	0	1	250	0	0	1.078	19.6	1.325	6
	Ne200	102	120	18	4.70	14.20	5.80	21.4	0	1	90	0	0	1.078	19.6	1.813	6
II	Ne0	57	141	4	1.50	14.50	0.80	21.7	0	0	0	0	0	1.079	19.8	1.177	6
	Ne25	33	123	11	1.10	14.90	3.80	20.8	0	0	0	0	0	1.079	19.7	1.177	6
	Ne50	38	116	22	0.60	14.89	5.90	19.6	0	0	0	1	90	1.078	19.6	1.409	6
	Ne100	52	161	12	0.90	16.16	3.70	19.7	0	0	0	4	360	1.077	19.3	1.556	6
	Ne200	82	142	14	1.60	15.40	4.30	19.1	0	2	330	0	0	1.074	18.6	1.458	6
III	Ne0	68	124	1	1.40	12.45	0.20	20.1	0	0	0	0	0	1.077	19.3	1.352	6
	Ne25	56	124	3	1.50	12.05	1.15	21.4	0	0	0	0	0	1.080	20.0	1.451	6
	Ne50	59	121	8	1.45	13.05	2.40	21.6	0	0	0	0	0	1.081	20.2	1.540	6
	Ne100	21	106	14	0.50	12.90	4.00	20.0	0	0	0	0	0	1.076	19.2	1.813	6
	Ne200	84	132	6	2.20	12.99	1.90	20.9	0	1	90	0	0	1.077	19.4	1.551	6

	Nc0	70	151	13	1.30	16.25	4.20	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.079	19.7	1.890	6
	Nc25	63	149	16	1.20	15.90	4.70	20.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.078	19.6	1.814	6
I	Nc50	40	149	29	0.80	15.60	8.30	18.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.073	18.5	1.292	6
	Nc100	52	132	15	1.20	16.50	5.25	17.9	0	0	3	430	0	0	1	250	0	0	0	1	1.072	18.1	1.391	6;7
	Nc200	76	138	17	1.25	13.69	5.20	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.076	19.1	1.870	5;6
	Nc0	30	156	12	0.70	19.35	3.40	20.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1.071	18.0	1.556	6
	Nc25	56	147	21	1.00	14.10	5.70	21.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.077	19.3	1.725	6
NI300	Nc50	40	125	29	0.70	14.20	8.50	21.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.076	19.1	2.169	6
	Nc100	50	118	30	0.85	12.19	9.20	20.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.074	18.6	1.721	7
	Nc200	57	170	16	1.10	17.80	4.10	20.5	0	0	2	180	0	0	0	0	0	0	0	1	1.078	19.6	1.765	6
	Nc0	71	137	5	1.40	14.35	1.40	19.9	0	0	1	250	0	0	0	0	0	0	0	2	1.075	18.9	1.818	6
	Nc25	48	108	11	1.00	11.70	2.80	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.073	18.6	2.083	6
III	Nc50	51	144	8	1.00	16.10	2.00	19.9	0	0	1	90	0	0	0	0	0	0	0	1	1.074	18.6	1.705	7
	Nc100	48	92	20	1.10	10.20	6.15	20.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.071	18.0	1.966	6;7
	Nc200	53	127	13	0.95	14.10	3.70	18.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.073	18.5	1.975	7
	Nc0	51	151	3	1.00	14.14	0.75	20.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1.077	19.3	1.255	
	Nc25	16	126	7	0.30	14.60	2.60	20.5	0	0	2.0	330	0	0	0	0	0	0	0	3	1.078	19.6	1.478	
I	Nc50	46	132	15	0.85	15.35	4.95	21.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1.077	19.2	1.424	
	Nc100	78	154	14	1.70	17.12	4.25	20.7	0	0	3.0	590	0	0	3	270	0	0	0	5	1.071	18.0	1.303	
	Nc200	50	144	24	1.30	16.20	7.90	20.7	0	0	3.0	590	0	0	0	0	0	0	0	4	1.075	18.8	1.623	
	Nc0	22	142	6	0.40	16.49	1.65	20.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1.070	17.6	1.068	
	Nc25	108	123	5	1.80	11.65	1.10	19.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1.067	17.1	1.467	
II	Nc50	51	131	2	1.00	11.10	0.50	18.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	bx	bx	1.891	
	Nc100	53	154	10	1.15	13.25	2.45	19.6	0	0	2	180	0	0	0	0	0	0	0	1	1.071	17.9	1.760	
	Nc200	72	135	12	1.50	14.10	3.10	18.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.075	18.9	1.858	
	Nc0	59	118	5	1.35	11.30	1.40	20.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.074	18.7	1.314	
	Nc25	58	119	0	1.20	12.25	0.00	21.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.073	18.4	1.457	
III	Nc50	37	122	7	0.70	12.50	2.15	20.2	0	0	1	250	0	0	0	0	0	0	0	3	1.073	18.4	1.579	
	Nc100	41	93	6	0.95	10.95	2.20	20.4	0	0	1	90	0	0	0	0	0	0	0	1	1.074	18.6	1.588	
	Nc200	80	118	2	1.45	12.60	0.60	19.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.073	18.4	1.907	

7.10 - Registos dos indicadores do estado nutritivo

Quadro A.7.10.1 - Ensaio de 1996

N(fundo)	Bloco	Nitratos nos peciolos						N total nas folhas		
		RQflex (mg NO ₃ ⁻ L ⁻¹)			Det. labor. (mg -NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)			N total nas folhas (%)		
		-----Dias após emergência-----								
		20	35	48	20	35	48	20	35	48
Nf0	I	2760	200		8790	479.5	1550	4.721	3.805	2.994
Nf50	I	5160	960	330	18751	336.5	1263	4.896	3.98	3.553
Nf100	I	8640	4200	960	22374	10201	1895	5.269	4.583	3.788
Nf200	I	11820	9420	7800	32149	22534	18229	5.438	5.033	4.742
Nf300	I	11100	10440	10080	35185	28313	22334	5.625	4.901	4.791
Eav	I	5400	1680		18698	6712	1923	4.906	4.035	3.23
Ebo	I	3900	540		13984	639.3	2124	4.446	3.811	3.026
RSU	I	2160			5993	233.2	1521	4.303	3.498	2.84
Nf0	II	6240	840		17899	1492	1292	4.786	3.854	2.972
Nf50	II	8820	2520	540	25037	8230	1349	5.126	4.348	3.426
Nf100	II	9360	4560	2820	30071	11666	10306	5.121	4.282	4.134
Nf200	II	11520	7920	6480	34999	22400	18831	5.28	5.192	4.643
Nf300	II	11520	10620	9900	38408	32895	21846	5.368	5.389	5.022
Eav	II	5640	1560	460	22827	5860	2182	4.863	4.266	3.75
Ebo	II	4560	500		17606	9589	1177	4.627	3.881	3.284
RSU	II	4260	2280		11560	1731	832.5	4.479	3.821	3.197
Nf0	III	4620	840		17366	1435	574.2	4.457	3.811	3.284
Nf50	III	6420	3900	380	22667	7090	516.7	4.759	4.49	3.405
Nf100	III	8940	5280	2460	27434	15674	4105	4.89	4.649	3.92
Nf200	III	10140	9120	7620	36517	26467	16449	5.197	5.29	4.967
Nf300	III	12240	11400	9240	35452	30802	23769	5.208	5.049	4.528
Eav	III	6300	3720	370	24425	24372	1493	4.852	4.353	3.547
Ebo	III	5700	1080	50	20589	3961	459.3	4.726	4.145	3.471
RSU	III	6120	1920	170	15235	2497	430.6	4.496	3.898	3.476

	Nc0	7680	7140	1000		533.91	373.59	128.84	30.89	5.8	5.6	7.1	9.2	5.42	4.55	3.78	3.08	47.9
	Nc25			3120	460			194.46	9.56			6.5	9.7			4.35	3.51	50.6
I	Nc50			4260	220			275.18	14.85			6.4	8.6			4.39	3.73	47.1
	Nc100			5880	2140			505.03	23.10			6.0	8.3			4.72	4.40	52.2
	Nc200			9000	5760			559.11	44.59			5.5	9.0			5.21	4.47	51.0
	Nc0	6780	7080	1020		597.80	370.54	103.39	12.83	5.6	5.3	6.9	9.9	5.55	4.54	4.01	2.97	47.4
	Nc25			4260	220			262.06	12.20			6.3	10.0			4.70	3.69	46.5
NF100 II	Nc50			4200				252.91	1.46			6.1	9.4			4.74	3.29	46.6
	Nc100			6120	700			396.47	26.68			5.5	8.8			5.13	3.82	52.1
	Nc200			7500	6210			648.98	216.64			6.1	9.1			5.54	4.49	53.0
	Nc0	6600	4200	1220	310	516.57	363.24	112.14	28.40	5.5	5.5	7.8	10.0	5.40	4.68	3.95	3.28	48.2
	Nc25			3600	110			215.13	16.41			7.3	8.9			4.50	3.23	48.3
III	Nc50			4080	260			310.57	12.36			6.2	9.5			4.86	3.64	50.1
	Nc100			5760	1720		580.76	353.12	76.66			6.4	9.0			5.04	3.77	52.0
	Nc200			9780	2320			611.20	12.67			6.2	7.9			5.35	5.02	49.5
	Nc0	8220	7260	4740	860	588.37	518.70	348.25	29.95	5.5	5.7	6.4	8.9	5.65	5.26	4.80	3.44	53.8
	Nc25			5340	700			427.65	15.01			5.8	9.0			4.82	3.82	52.1
I	Nc50			4500	1460			413.24	64.99			5.3	8.1			4.94	4.03	49.0
	Nc100			5580	1120			341.60	57.05			5.5	8.5			5.19	4.61	50.8
	Nc0	8460	7080	4500	1140	640.69	602.06	354.16	56.11	5.5	4.8	6.0	8.3	5.70	5.53	4.75	3.95	49.0
	Nc25			3660	600			259.98	13.29			5.8	7.7			4.97	3.56	47.9
NF200 II	Nc50			4860	2040			323.69	95.66			6.6	8.0			4.94	3.97	50.1
	Nc100			7020	5640			514.17	259.77			6.0	7.6			4.86	4.31	48.4
	Nc0	9120	11400	7080	1600	679.94	636.74	413.96	93.01	5.9	5.6	6.2	9.0	5.68	5.09	5.12	3.85	52.0
	Nc25			8040	4280			543.60	181.30			6.1	8.4			5.20	4.47	53.3
III	Nc50			5280	5000			325.29	165.57			6.0	8.6			5.38	4.04	53.4
	Nc100			7200	4720			505.03	214.31			6.2	7.5			5.32	4.35	54.2
	Nc0	7500	12840	8640	6960	674.77	625.79	748.39	1.68	5.7	5.4	6.2	8.5	5.54	5.31	5.03	4.02	54.5
	Nc25			6780	4040			609.21	1.88			5.7	8.4			5.22	4.69	52.7
I	Nc50			8040	6780			772.65	2.24			5.3	7.1			5.49	4.73	53.8
	Nc100			9000	6240			690.34	12.52			5.4	7.3			4.44	4.84	53.4
	Nc0	9120	6360	6060	5400	647.99	611.79	584.97	207.45	5.5	5.4	5.6	7.8	5.76	5.49	5.37	4.15	53.3
	Nc25			6120	4920			557.64	242.33			6.1	7.6			5.02	4.79	52.8
NF300 II	Nc50			6720	6900			658.09	295.58			6.1	7.5			5.17	4.67	51.6
	Nc100			7260	4560			678.77	233.61			5.6	7.5			5.25	4.46	52.3

	Nc0	420	220	50	14.49	31.34	18.88	11.43	5.7	5.5	6.2	9.4	4.40	4.22	3.82	3.12	44.3
	Nc25		2700	320		219.95	1.85	10.18		4.6	6.1	7.7		4.35	3.78	2.95	43.3
I	Nc50		3420	420		356.25	16.25	9.25		4.6	5.3	8.5		4.73	4.01	3.20	46.2
	Nc100		4020	2520	180	425.30	168.77	23.10		4.7	5.4	8.0		5.15	4.34	3.35	50.2
	Nc200		5640	5640	3700	556.42	508.52	76.35		4.8	5.1	8.8		5.42	5.18	3.92	51.4
	Nc0	3180	480	70	271.98	38.33	50.11	9.40	5.4	5.4	6.5	9.8	5.11	4.67	3.96	3.04	45.2
	Nc25		4700	1570	110	394.88	86.69	5.35		5.2	6.7	8.9		5.13	4.58	3.22	47.0
II	Nc50		4980	1600		479.15	92.65	2.86		5.0	6.4	9.1		4.91	4.15	2.99	46.7
	Nc100		3180	2640	90	370.54	164.23	7.69		4.9	5.9	8.7		5.17	4.50	3.43	51.4
	Nc200		5640	7680	4480	558.86	486.34	105.16		4.9	5.7	9.5		5.50	5.34	4.10	54.9
	Nc0	780	220	100	31.94	26.47	38.97	1.06	6.0	6.0	6.9	9.9	4.55	4.11	3.71	3.10	43.0
	Nc25		2740	160		202.92	5.17	103.91		5.5	6.8	9.1		4.30	3.99	3.28	44.0
III	Nc50		4620	1720		344.08	139.58	282.19		5.8	6.9	10.0		4.80	4.37	3.29	50.6
	Nc100		6420	2760	120	483.11	175.77	9.87		5.6	6.6	9.1		5.06	4.49	3.51	50.6
	Nc200		6660	4980	500	568.90	414.76	1.50		5.6	5.8	8.8		5.48	5.29	3.89	53.3

	Nc0	4560	5160	1280	165	376.59	325.33	82.72	27.73	5.5	5.3	6.7	9.0	5.368	5.133	4.634	2.987	56.0	54.0	44.8	35.3
	Nc25		1820	170			107.26	12.96				7.3	9.0		4.447	2.883					
	Nc50		4080	285			210.82	28.62				6.9	8.0		4.695	3.239					
	Nc100		5280	640			353.05	33.67				6.7	8.0		5.133	3.602					
	Nc200		8100	2100			552.11	99.10				5.8	8.0		5.567	4.099					
	Nc0	6420	6180	1740	25	528.91	453.46	99.67	16.56	4.9	4.8	6.7	9.0	5.626	5.417	4.360	2.702	59.7	56.7	46.1	35.6
	Nc25		4640	320			343.37	22.81				5.9	9.0		4.854	3.579					
	Nc50		4200	340			311.77	19.94				6.5	9.0		5.183	3.277					
	Nc100		7860	1140			473.12	59.18				6.3	9.0		5.430	3.816					
	Nc200		8640	1740			579.78	73.80				6.3	9.0		5.719	3.732					
	Nc0	7020	6660	1280	0	583.38	439.50	94.50	1.02	4.9	4.7	7.1	9.0	5.648	5.363	4.392	2.362	61.4	57.3	45.2	31.6
	Nc25		5040	165			307.82	13.51				7.0	9.0		4.367	3.195					
	Nc50		6600	300			463.09	23.05				6.5	9.0		5.204	3.332					
	Nc100		5940	840			591.02	21.02				5.6	9.0		5.457	3.645					
	Nc200		7560	3780			644.19	185.34				5.7	9.0		5.967	3.436					
	Nc0	6780	7080	2840	0	582.03	482.06	187.62	2.43	4.7	5.2	7.6	8.0	5.472	5.110	4.546	2.900	61.6	56.3	49.1	37.6
	Nc25		4580	120			320.77	9.51				7.5	8.0		4.641	3.124					
	Nc50		5100	680			378.61	47.52				7.3	8.0		4.777	3.612					
	Nc100		5520	380			384.32	27.82				6.7	8.0		5.074	3.513					
	Nc200		8700	2940			642.22	160.92				6.8	9.0		5.507	3.792					
	Nc0	6720	7920	5460	540	537.99	486.24	385.00	14.43	5.1	4.3	7.0	9.0	5.765	5.703	4.869	2.970	61.6	55.4	49.3	40.2
	Nc25		5760	460			355.22	38.04				7.0	8.0		5.101	3.694					
	Nc50		8280	3200			466.43	108.36				6.4	9.0		5.337	4.121					
	Nc100		8940	4940			612.90	164.41				5.8	8.0		5.622	4.319					
	Nc200		9720	5160			574.31	234.17				6.3	8.0		5.609	4.445					
	Nc0	7560	6960	7980	980	667.44	525.08	513.53	47.89	5.0	4.8	6.7	9.0	5.752	5.598	5.123	3.333	59.0	54.4	50.5	43.2
	Nc25		8700	2000			627.48	79.06				5.6	9.0		5.370	3.623					
	Nc50		6840	2520			549.69	114.61				5.5	8.0		5.808	4.236					
	Nc100		7860	2880			580.99	118.67				5.5	8.0		5.469	4.198					
	Nc200		9480	5850			686.74	242.31				5.5	8.0		5.996	4.176					
	Nc0	6780	8400	5700	1000	624.74	507.64	288.50	54.41	5.6	4.9	7.3	9.0	5.544	5.423	4.833	3.612	60.7	57.5	50.1	42.7
	Nc25		7140	1100			455.94	50.93				7.1	9.0		4.964	3.607					
	Nc50		8340	5040			586.74	256.49				6.6	8.0		5.479	4.357					
	Nc100		7860	3260			587.08	114.43				6.8	9.0		5.628	4.099					
	Nc200		9180	4080			553.12	232.54				6.6	8.0		5.609	4.286					

	Nc0	7740	10320	8460	3980	706.11	656.00	639.64	174.17	5.2	4.9	5.9	8.0	5.796	5.544	5.331	4.636	61.2	60.3	50.2	51.0
	Nc25		9480	4860			612.29	249.52				6.3	9.0		5.523	4.368					
I	Nc50		8880	3380			571.57	196.27				6.1	8.0		5.194	4.209					
	Nc100		8580	3620			543.01	215.80				5.9	7.0		5.478	4.603					
	Nc200		9420	6840			657.87	364.63				5.9	8.0		5.945	4.636					
	Nc0	7560	9960	8700	2900	673.49	641.12	498.95	207.19	5.2	5.0	6.8	8.0	5.960	5.485	5.227	4.539	62.0	57.1	49.3	52.3
	Nc25		8580	4740			571.57	258.35				6.3	8.0		5.271	4.593					
NF300	Nc50		7500	4100			651.49	204.64				6.0	8.0		5.719	3.984					
	Nc100		9300	5640			544.53	272.54				6.7	9.0		5.829	4.346					
	Nc200		9660	5580			654.53	324.63				6.5	9.0		5.501	4.357					
	Nc0	8040	6660	8640	3300	719.89	484.62	563.06	206.73	5.2	4.2	6.7	8.0	5.565	5.812	5.516	4.100	59.9	56.1	49.6	49.2
	Nc25		9120	7380			637.51	370.90				5.8	7.0		5.825	5.174					
III	Nc50		9720	4260			732.32	271.68				5.7	8.0		5.658	4.719					
	Nc100		8040	2520			655.13	174.41				5.2	7.0		5.797	4.708					
	Nc200		10860	6900			678.84	389.74				6.0	7.0		5.958	5.097					
	Nc0	4800	4500	340	0	400.13	331.37	10.03	0.92	5.1	4.6	6.9	8.0	5.609	5.429	4.310	2.467	59.7	52.6	44.4	31.5
	Nc25		2320	60			125.19	3.39				6.6	8.0		4.414	2.692					
I	Nc50		3420	0			195.08	2.00				6.0	8.0		4.919	3.091					
	Nc100		6060	480			376.19	21.24				6.2	8.0		5.112	3.666					
	Nc200		9000	720			514.44	48.41				6.4	8.0		5.298	3.705					
	Nc0	5400	5400	1320	0	464.69	340.44	91.77	10.28	5.0	5.1	6.7	7.0	5.351	5.083	4.458	3.316	62.2	55.3	46.5	33.9
	Nc25		4500	0			299.31	3.20				6.7	9.0		4.975	2.669					
II	Nc50		5000	275			348.84	53.21				6.3	8.0		4.946	3.392					
	Nc100		6780	1140			457.01	83.40				5.7	8.0		5.304	3.705					
	Nc200		8580	5700			588.59	271.84				6.0	7.0		5.697	4.236					
	Nc0	4260	4560	820	400	362.80	355.79	34.53	32.22	5.3	4.8	6.8	8.0	5.476	5.286	4.387	3.233	57.5	54.4	44.0	33.8
	Nc25		3160	740			169.86	52.47				6.8	8.0		4.579	3.173					
III	Nc50		2820	750			199.94	67.83				6.7	7.0		4.974	3.349					
	Nc100		4980	1480			388.95	96.51				6.1	7.0		5.056	4.051					
	Nc200		6300	3480			520.52	198.59				6.2	8.0		5.658	4.512					

	Nc0	3360	3240	20	5	275.72	287.65	4.60	6.19	4.7	4.5	6.7	8.0	5.417	5.071	4.091	2.368	56.4	51.3	41.7	31.3
	Nc25			980	5		46.49	11.05				6.7	8.0		4.414	2.878					
I	Nc50			2500	35		149.50	4.49				6.1	9.0		4.831	3.031					
	Nc100			4380	120		264.06	11.48				6.7	8.0		4.871	3.474					
	Nc200			6420	1260		485.88	47.40				6.5	9.0		5.483	3.878					
	Nc0	3720	4080	20	0	345.99	246.73	2.15	12.06	5.0	4.8	7.2	8.0	5.335	5.072	4.097	2.390	55.7	53.3	39.5	28.8
	Nc25			1960	10		144.64	7.73				6.2	8.0		4.814	2.774					
II	Nc50			3960	10		283.51	1.54				5.9	8.0		5.110	2.922					
	Nc100			5280	260		319.67	10.06				5.5	8.0		5.242	3.337					
	Nc200			6360	840		481.93	43.79				5.4	8.0		5.633	3.848					
	Nc0	3600	2820	440	60	319.77	206.26	34.17	20.68	5.3	5.3	6.9	9.0	5.122	4.847	4.206	2.834	58.0	52.7	41.5	32.9
	Nc25			1160	0		76.33	2.95				6.8	9.0		4.655	2.834					
III	Nc50			3480	0		217.21	2.31				6.4	9.0		4.798	2.922					
	Nc100			5040	620		313.71	26.31				6.0	9.0		5.200	3.552					
	Nc200			8880	3000		517.81	123.87				7.1	9.0		5.397	4.138					
	Nc0	3840	3120	100	0	316.74	143.48	5.81	1.29	4.9	4.4	7.8	9.0	5.363	4.929	3.839	2.774	59.1	54.1	42.3	35.2
	Nc25			1220	5		63.20	1.39				7.5	9.0		3.954	2.943					
I	Nc50			1960	0		119.72	0.80				6.9	8.0		4.348	2.724					
	Nc100			4200	140		306.90	6.59				7.0	8.0		4.754	3.354					
	Nc200			7320	1020		443.34	45.70				7.0	9.0		5.260	3.398					
	Nc0	3900	5040	60	0	308.33	225.10	4.56	1.26	4.7	5.0	7.4	8.0	5.388	4.442	3.833	2.445	57.6	52.2	42.3	31.4
	Nc25			760	0		38.29	2.46				6.8	7.0		4.140	2.702					
II	Nc50			1320	0		73.23	1.35				6.6	7.0		4.409	2.955					
	Nc100			6180	220		386.52	20.31				6.1	8.0		5.271	3.567					
	Nc200			8460	2460		546.35	137.20				6.0	8.0		5.551	4.154					
	Nc0	3480	4200	460	275	322.12	237.66	33.43	17.39	5.2	4.4	7.0	8.0	5.253	5.061	4.343	2.992	57.1	54.8	44.3	32.1
	Nc25			1100	195		65.64	20.96				6.9	8.0		4.513	3.141					
III	Nc50			3280	415		180.80	30.38				6.4	7.0		4.645	3.612					
	Nc100			4860	2000		365.55	106.67				6.3	7.0		5.050	3.748					
	Nc200			7080	2340		533.89	105.99				6.0	8.0		5.490	4.198					

7.11 - Registos na cultura intercalar

Quadro A.7.11.1 - Ensaio de 1996

N (fundo)	Bloco	Fevereiro			Abril		
		(análise de plantas)			(análise de plantas)		
		RQflex (mg NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	MS (%)	N total (%)	P. fresco (g/4m ²)	MS (%)	N total (%)
Nf0	I	66.7	17.8	2.630	2765.5	30.6	1.179
Nf50	I	86.7	16.9	3.021	4935.6	27.4	0.944
Nf100	I	113.3	17.3	3.102	3012.1	30.6	1.009
Nf200	I	160.0	17.0	3.069	8654.3	28.7	0.899
Nf300	I	100.0	18.0	3.025	4670.0	28.2	0.927
Eav	I	46.7	17.8	2.729	4220.6	28.8	0.883
Ebo	I	113.3	17.6	3.047	3783.1	28.7	0.927
RSU	I	160.0	17.9	2.977	2854.6	29.6	0.905
Nf0	II	100.0	17.2	3.272	3785.6	28.6	0.916
Nf50	II	166.7	16.7	3.266	4451.1	27.3	0.911
Nf100	II	60.0	17.8	2.780	5397.2	26.2	0.938
Nf200	II	93.3	17.4	3.140	5370.9	27.1	0.949
Nf300	II	106.7	17.6	3.235	5381.2	27.0	0.960
Eav	II	120.0	16.8	3.103	5294.0	27.2	1.047
Ebo	II	86.7	17.6	2.972	5113.7	27.6	0.965
RSU	II	93.3	17.4	3.217	4885.0	28.4	0.825
Nf0	III	53.3	18.8	2.669	5851.3	26.9	0.954
Nf50	III	40.0	18.8	2.811	6513.4	26.1	0.938
Nf100	III	33.3	19.3	2.510	8489.5	26.8	0.872
Nf200	III	46.7	19.0	2.517	5873.8	28.4	0.927
Nf300	III	40.0	19.5	2.043	5868.8	26.9	0.927
Eav	III	93.3	18.4	2.785	7813.1	26.6	0.905
Ebo	III	40.0	18.6	2.582	6601.1	27.3	0.889
RSU	III	93.3	18.4	2.857	5934.9	25.9	0.938

Quadro A.7.11.2 - Ensaio de 1997

N (fundo) Bloco		Fevereiro			Abril		
		(análise de plantas)			(análise de plantas)		
		RQflex (mg NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	MS (%)	N total (%)	P. fresco (g/2 m ²)	MS (%)	N total (%)
Nf0	I	30	0.33	2.815	646.1	0.25	1.490
	II	70	0.26	2.826	931.9	0.24	1.704
	III	60	0.25	3.111	1417.3	0.27	1.479
Nf50	I	90	0.26	3.155	1515.5	0.23	1.682
	II	80	0.26	3.138	1751.7	0.25	1.534
	III	210	0.23	3.029	2480.0	0.21	1.813
Nf100	I	110	0.28	2.908	926.9	0.23	1.781
	II	160	0.25	3.210	1336.7	0.25	1.644
	III	110	0.26	3.111	1124.5		1.490
Nf200	I	180	0.29	2.568	619.3	0.29	1.506
	II	130	0.27	3.138	870.5	0.28	1.342
	III	50	0.25	3.150	2370.0	0.22	2.329
Nf300	I	110	0.26	3.002	1354.2	0.25	1.666
	II	110	0.29	2.821	1381.3	0.25	1.588
	III	180	0.26	3.155	1781.2	0.23	1.967
Eav	I	50	0.26	2.826	721.5	0.25	1.578
	II	60	0.27	3.007	1462.3	0.23	1.567
	III	30	0.25	3.072	1050.7	0.24	1.709
Ebo	I	80	0.31	2.645	1680.9	0.24	1.518
	II	30	0.29	2.536	584.3	0.28	1.446
	III	30	0.27	2.903	1154.9	0.26	1.408
RSU	I	50	0.27	2.771	746.5	0.26	1.435
	II	110	0.25	3.078	2290.0	0.23	1.813
	III	30	0.26	2.831	996.0	0.26	1.244

Quadro A.7.11.3 - Ensaio de 1998

N (fundo)	Bloco	Fevereiro				Abril		
		(análise de plantas)				(análise de plantas)		
		RQflex (mg NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	Det. Lab. (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	MS (%)	N total (%)	P. fresco (g/2 m ²)	MS (%)	N total (%)
Nf0	I		3.202	15.9	2.650	3750	25.0	1.002
	II		16.219	13.4	2.914	3750	24.0	0.831
	III	12	204.377	13.4	3.506	4700	21.0	1.035
Nf50	I		62.510	14.6	3.451	4300	22.0	1.101
	II	9	115.832	14.0	3.659	5400	23.0	1.029
	III		12.808	15.9	3.072	6300	25.0	1.002
Nf100	I		25.408	14.1	3.221	5600	22.0	0.974
	II		33.692	14.3	3.473	4400	23.0	0.952
	III		81.862	13.9	3.626	5000	23.0	1.062
Nf200	I		40.305	14.1	3.407	5200	24.0	1.232
	II		16.428	14.2	3.385	4400	26.0	0.804
	III	27	327.170	13.7	4.027	8750	22.0	1.012
Nf300	I	16	245.308	13.8	3.500	6550	23.0	0.936
	II		112.769	14.1	3.900	6750	21.0	0.930
	III	14	224.146	13.0	4.306	6500	23.0	1.396
Eav	I		46.778	15.1	2.761	2750	26.0	1.051
	II		94.044	14.5	2.914	3900	26.0	1.023
	III		28.610	13.9	3.347	6300	24.0	1.040
Ebo	I		21.022	12.2	3.068	3950	25.0	1.068
	II		28.680	15.6	2.887	4250	24.0	1.073
	III		16.428	15.1	3.435	4850	22.0	1.089
RSU	I		76.224	14.7	3.654	4950	21.0	1.150
	II		14.479	14.6	3.358	3900	25.0	0.969
	III	7	18.516	15.2	3.418	5650	23.0	1.056

7.12 - Registos do azoto inorgânico residual no perfil

Quadro A.7.12.1 - Ensaio de 1996/1997

Maio, 1996		Outubro, 1996		Abril, 1997			
Bloco	Prof. (cm)	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)		N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	
		0-30	30-60	0-30 cm	30-60 cm	s/intercalar	c/intercalar
						0-30 cm	30-60 cm
I	0-30	0.600	1.564	2.99	1.72	7.22	5.10
I	30-60	0.361	1.215	5.92	4.03	12.47	6.29
II	0-30	0.494	1.245	3.67	3.45	8.04	3.46
II	30-60	0.456	0.952	3.28	2.01	7.63	5.52
III	0-30	0.384	0.997	6.47	3.53	11.13	5.74
III	30-60	0.335	0.981	3.00	3.05	9.31	5.25
				4.02	1.85	9.54	5.31
				6.95	4.75	14.14	9.34
				6.12	4.82	9.13	3.93
				4.89	2.61	7.34	9.06
				8.59	5.06	9.89	6.34
				6.13	3.91	15.55	12.69
				7.77	9.93	6.08	8.01
				10.32	6.60	25.08	7.61
				7.11	4.43	14.31	7.18
				4.21	1.86	9.02	4.11
				6.83	4.93	8.52	5.78
				5.03	4.48	9.35	4.31
				4.04	2.21	7.38	5.08
				6.45	3.53	11.78	7.85
				4.70	3.86	10.13	6.55
				5.43	2.30	7.49	3.31
				5.57	3.33	11.94	4.98
				2.23	2.30	10.87	5.70
						2.17	2.86
						2.79	0.75
						3.01	1.19
						2.63	1.71
						3.04	0.86
						1.89	0.84
						3.51	2.27
						2.84	1.07
						4.06	1.30
						2.91	1.74
						2.79	1.50
						2.61	1.24

Quadro A.7.12.3 - Ensaio de 1998/99

Maio, 1998		Abril, 1999											
		N inorgânico no solo (mg N kg ⁻¹)						N inorgânico no solo (mg N kg ⁻¹)					
		0-30 cm		30-60 cm		s/intercalar		0-30 cm		30-60 cm		c/intercalar	
Prof.	N-NO ₃ ⁻ N-NH ₄ ⁺	0-30 cm		30-60 cm		s/intercalar		0-30 cm		30-60 cm		c/intercalar	
Bloco (cm)	(mg kg ⁻¹)	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
I	0-30	1.869	1.828	2.490	3.229	2.053	1.678	0.620	6.007	0.543	5.643	0.413	0.000
I	30-60	1.298	0.746	1.391	5.572	1.550	3.947	0.372	5.331	0.428	4.116	0.435	2.777
II	0-30	1.914	1.601	1.244	3.990	1.576	3.868	0.297	6.037	0.270	4.760	0.471	1.375
II	30-60	1.265	0.638	1.307	4.118	2.293	3.135	0.349	6.656	0.251	4.907	0.404	1.466
III	0-30	1.758	1.742	1.488	4.167	1.664	2.296	0.326	6.002	0.253	5.803	0.432	0.403
III	30-60	1.259	0.671	1.368	4.439	1.943	3.477	0.908	7.038	0.242	6.218	0.623	2.725
I				0.936	5.597	1.666	3.387	0.282	6.603	0.353	5.762	0.690	2.539
II				1.174	6.349	1.689	4.767	0.203	8.512	0.249	8.866	0.762	1.968
III				1.381	6.252	2.527	6.740	0.259	6.007	0.246	4.658	0.250	0.000
I				1.196	5.087	1.655	3.378	1.431	5.625	0.576	4.324	0.425	0.013
II				0.855	7.118	1.787	2.703	5.015	6.740	0.647	3.387	0.415	0.000
III				0.792	8.662	1.856	7.247	0.264	6.271	0.305	7.142	0.280	1.818
I				1.459	8.610	2.298	7.404	0.419	5.738	0.690	4.720	0.615	1.809
II				1.118	4.957	1.315	3.697	0.264	7.921	0.280	5.321	0.512	0.248
III				1.115	5.799	2.733	4.958	0.321	8.064	0.229	6.631	0.490	1.260
I				0.834	7.272	1.337	3.393	0.461	6.757	0.381	5.238	0.630	1.614
II				1.635	4.546	1.789	2.678	0.304	6.267	0.510	5.866	0.497	1.722
III				1.637	4.223	2.871	3.036	0.537	6.706	0.289	5.609	0.375	0.681
I				2.021	3.667	1.343	2.040	0.491	6.493	0.363	3.624	0.773	0.000
II				1.495	2.957	1.198	1.020	0.416	8.014	0.364	5.291	1.790	0.000
III				2.791	3.613	1.986	1.436	0.196	6.760	1.717	2.794	0.216	2.027
I				2.042	3.347	1.985	2.136	0.633	4.929	1.718	4.278	1.119	0.453
II				1.551	6.578	2.104	3.535	0.281	8.125	0.336	7.664	0.598	2.218
III				1.778	2.893	1.963	1.076	0.242	6.765	0.440	3.283	0.263	1.826

7.13 - Registos da incubação *in situ*

Quadro A.7.13.1 - Ensaio de 1996

1996	*d1, **dir d2, ***t	d2, dir	d3, t	d3, dir	d4, t	d4, dir	d5, t	d5, dir	d6, t	d6, dir	d7, t	d7, dir	d8, t	d8, dir	d9, t	d9, dir	d10, t	d10, dir	d11, t	d11, dir		
N-NO ₃ - mg kg ⁻¹																						
Trat	Bloco																					
Nf0	I	3.214	10.907	8.756	20.715	10.934	19.429	6.207	13.876	2.271	9.469	3.990	6.408	0.870	6.537	2.413	4.199	1.507	5.332	2.837	6.770	3.317
	II	4.287	10.286	7.693	22.817	16.264	25.359	7.010	16.667	2.860	9.313	1.335	6.535	1.033	7.371	1.522	5.648	1.859	6.178	3.936	7.013	3.825
	III	4.062	8.269	10.183	21.525	9.461	17.029	4.796	10.975	3.497	9.511	2.105	8.152	3.008	7.862	1.133	4.192	2.448	7.041	3.253	8.979	2.994
Nf100	I	6.106	28.197	11.833	23.336	14.010	23.456	5.930	13.692	1.875	9.686							1.859	6.591	4.402	9.121	4.780
	II	7.001	22.310	13.014	23.625	8.118	17.056	5.927	15.463	2.370	12.144							2.575	10.494	4.196	9.249	6.315
	III	5.579	14.083	12.772	25.553	14.881	21.307	2.955	12.713	2.249	11.490							1.627	11.392	2.805	9.179	3.538
Eav	I	7.828	10.365	11.533	21.262	18.031	26.566	4.335	18.269	5.516	10.993							1.238	10.619	2.954	6.978	3.481
	II	8.025	29.090	11.746	23.767	13.230	24.429	7.175	13.832	5.621	15.052							3.126	9.700	3.583	9.330	5.447
	III	4.291	18.190	17.956	24.872	10.228	20.039	4.356	13.363	1.984	13.389							4.025	11.283	3.798	7.070	6.311
Ebo	I	4.862	12.109	10.292	16.565	12.904	14.549	2.324	11.629	2.145	11.348							1.686	6.166	4.201	8.275	4.537
	II	4.081	8.861	19.528	23.817	10.777	16.351	6.902	17.901	3.798	13.770							1.848	7.595	3.982	9.343	5.056
	III	3.924	8.837	7.007	19.433	9.755	19.084	3.920	11.305	2.767	12.000							2.173	8.848	3.848	7.421	4.263
RSU	I	3.872	9.253	6.494	13.769	12.009	12.435	2.954	9.295	2.023	13.083							1.316	9.111	3.580	6.992	4.384
	II	5.269	7.590	8.047	17.829	10.460	16.944	4.264	11.517	2.776	12.042							1.208	7.531	3.002	8.808	2.998
	III	3.472	7.530	4.961	15.024	11.649	19.085	3.697	5.515	2.331	11.081							0.935	6.553	4.585	8.327	3.340

* d1,...,dn - sequência cronológica das datas de amostragem

** - terra fresca directa (sem incubação)

*** - terra dos tubos (após período de incubação)

Quadro A.7.13.2 - Ensaio de 1997

Trat	Bloco	---ng kg ⁻¹																	
		d1, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d2, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d2, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d3, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d3, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d4, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d4, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d5, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d5, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d6, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d6, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d7, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d7, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d8, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d8, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d9, t N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	d9, dir N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃	
NF0	I	2.407	1.547	1.805	5.326	5.915	2.922	3.730	4.924	2.437	1.872	1.861	7.890	1.563	3.017	1.358	9.014	1.595	4.517
	II	3.069	8.533	2.419	16.826	6.082	13.197	5.090	13.788	3.029	4.651	2.423	10.513	2.057	3.570	1.876	8.293	2.229	5.584
	III	1.869	10.009	1.446	14.071	5.373	5.694	4.837	10.401	2.875	3.290	1.801	7.329	1.765	2.717	1.683	9.271	1.640	5.843
NF100	I	10.166	19.363	2.423	27.932	5.586	25.258	4.553	23.454	2.869	17.306	2.142	35.066	3.301	4.237	1.714	11.095	1.877	4.903
	II	10.302	40.733	3.606	61.079	5.116	23.186	4.707	39.844	3.623	16.664	1.712	26.735	2.606	3.897	1.369	12.222	1.761	5.597
	III	13.173	27.897	1.235	40.944	5.069	20.313	5.744	30.358	2.800	12.402	1.545	19.668	2.144	3.901	2.369	9.830	1.965	5.245
Eav	I	2.982	5.430	2.371	9.483	5.026	5.029	5.273	12.326	3.572	6.048	2.247	16.003	2.871	4.739	1.915	11.656	1.777	5.433
	II	3.506	15.885	2.274	18.293	5.200	9.218	4.554	20.785	2.940	11.562	2.583	17.417	2.638	4.387	1.499	8.425	1.811	5.467
	III	3.542	6.499	3.449	20.294	5.159	13.056	5.258	22.668	3.736	4.896	2.385	12.918	2.814	3.085	1.873	10.302	2.371	5.264
Ebo	I	1.809	3.843	2.417	8.709	5.049	4.528	5.008	6.917	2.593	6.210	1.749	13.603	2.089	2.476	1.647	7.257	1.838	4.947
	II	2.185	3.086	2.004	7.996	4.753	5.092	4.346	11.021	2.579	2.077	1.997	10.110	2.419	2.454	1.886	7.831	2.115	3.754
	III	2.134	2.666	2.692	6.899	5.062	3.238	4.139	10.221	4.448	2.521	1.768	9.737	2.373	3.167	2.429	11.561	1.827	4.308
RSU	I	2.328	1.067	1.720	2.479	4.403	1.539	3.507	3.988	3.016	2.536	3.933	11.849	1.864	2.527	2.345	8.680	2.767	4.370
	II	3.631	11.121	2.857	15.964	5.816	5.267	6.846	17.662	3.898	5.126	2.342	14.028	2.656	4.010	1.489	11.308	2.158	6.524
	III	2.702	1.696	2.402	3.566	6.146	2.741	5.033	6.379	5.312	3.774	2.694	9.356	2.796	2.742	2.785	7.542	2.118	4.904
NF0	I	1.680	9.240	1.118	4.713	1.850	9.760	1.702	4.566	2.596	7.944	2.285	4.297	2.051	9.423	1.705	3.075		
	II	1.115	11.501	0.487	5.410	1.120	10.635	1.680	4.912	1.601	9.089	0.818	5.426	0.962	10.115	0.786	6.580		
	III	1.378	12.207	0.926	5.462	1.699	10.808	0.762	5.184	1.421	10.733	1.085	5.459	1.218	10.900	1.878	3.608		
NF100	I	1.127	12.693	0.595	4.884	1.113	9.542	1.191	5.420	1.330	9.937	0.499	5.341	0.602	12.782	1.189	4.777		
	II	1.045	12.446	0.542	6.170	0.652	11.846	1.149	5.027	1.219	12.268	0.596	6.720	0.670	13.815	1.213	5.362		
	III	1.108	17.084	0.794	6.613	1.357	12.818	0.879	6.040	1.663	13.220	0.645	6.611	0.774	12.270	1.115	6.172		
Eav	I	1.069	11.868	0.599	4.830	1.245	13.969	1.705	5.814	1.423	14.165	0.914	6.805	1.719	21.271	1.057	8.450		
	II	1.430	11.801	1.039	7.109	1.672	12.261	1.880	5.272	1.656	11.525	1.364	5.561	1.422	10.666	1.359	4.849		
	III	1.932	13.100	1.383	5.397	1.708	11.456	1.799	3.647	2.004	9.302	1.016	4.713	1.147	11.739	1.780	3.208		
Ebo	I	1.539	8.628	1.181	5.020	1.671	10.313	1.791	3.848	2.198	9.807	1.096	4.794	1.352	9.320	1.524	3.503		
	II	2.327	9.490	1.175	4.376	1.766	9.970	2.545	3.656	2.077	8.016	1.563	4.508	1.511	9.076	1.720	3.961		
	III	1.310	11.070	0.836	4.520	1.350	11.610	1.529	4.385	1.934	8.561	0.878	5.106	1.039	12.099	2.050	5.299		
RSU	I	2.966	16.136	1.545	4.313	1.548	10.547	1.910	3.785	2.911	8.192	1.651	5.100	1.751	8.421	2.433	3.549		
	II	1.473	16.094	0.718	5.595	1.337	16.628	1.036	6.522	1.148	13.527	0.729	7.440	1.636	16.568	1.165	7.742		
	III	2.173	13.515	0.736	4.737	1.710	10.396	1.928	4.599	1.963	15.568	1.330	4.873	1.356	15.435	2.334	3.537		

Quadro A.7.13.3 - Ensaio de 1998

Trat	Bloco	mg kg ⁻¹																	
		d1, dir N-NH ₄ ⁺	d2, t N-NH ₄ ⁺	d2, dir N-NH ₄ ⁺	d3, t N-NH ₄ ⁺	d3, dir N-NH ₄ ⁺	d4, t N-NH ₄ ⁺	d4, dir N-NH ₄ ⁺	d5, t N-NH ₄ ⁺	d5, dir N-NH ₄ ⁺	d6, t N-NO ₃ ⁻	d6, dir N-NO ₃ ⁻	d7, t N-NO ₃ ⁻	d7, dir N-NO ₃ ⁻	d8, t N-NO ₃ ⁻	d8, dir N-NO ₃ ⁻	d9, t N-NO ₃ ⁻	d9, dir N-NO ₃ ⁻	
Nf0	I	1.252	1.346	0.487	5.006	1.532	2.307	1.145	8.792	1.336	3.949	1.072	12.487	2.231	2.927	1.331	11.992	1.544	1.177
	II	2.009	2.344	1.983	6.553	3.102	4.563	1.627	18.046	3.321	4.129	1.700	9.703	1.370	2.708	0.852	7.782	1.346	0.803
	III	3.324	1.889	0.410	6.146	3.529	5.450	1.370	17.662	2.718	3.212	2.087	12.584	1.246	2.269	0.715	8.441	1.302	1.520
Nf100	I	24.548	4.315	8.876	31.125	5.999	10.413	1.321	36.066	2.511	5.290	1.228	17.715	1.445	2.954	0.782	11.441	1.724	1.574
	II	15.828	3.068	6.188	25.886	4.954	10.913	1.219	36.207	4.017	6.703	1.730	18.317	1.858	2.196	1.187	11.147	1.163	1.125
	III	10.481	3.180	4.394	31.355	4.722	8.440	1.908	31.596	2.976	6.106	1.935	20.290	1.587	4.011	0.902	13.009	1.414	1.722
Eav	I	2.562	1.939	1.439	8.131	1.887	3.024	1.917	8.567	2.546	5.726	1.780	17.834	1.704	2.156	1.658	9.377	1.904	1.071
	II	4.222	2.884	1.189	15.745	1.859	4.111	2.174	17.475	2.461	4.860	1.243	17.860	1.107	3.081	0.915	15.555	1.765	1.741
	III	7.702	2.249	2.498	9.785	2.599	4.777	2.741	19.717	3.922	7.371	2.511	15.919	2.509	2.883	1.512	13.078	2.026	1.466
Ebo	I	1.276	2.696	0.589	6.364	1.489	2.583	1.430	9.546	1.531	2.628	1.123	11.281	1.617	2.547	1.168	11.438	1.856	0.782
	II	1.015	2.177	0.540	5.816	1.639	2.591	1.039	9.553	1.424	3.053	1.397	12.138	1.168	3.189	0.658	9.552	1.601	1.142
	III	1.304	2.154	0.909	9.051	1.519	4.580	1.641	13.196	1.981	3.630	2.730	14.942	3.002	3.203	1.457	12.773	1.860	2.093
RSU	I	3.578	1.581	1.354	7.810	1.720	3.426	1.365	10.369	3.321	6.153	1.717	13.273	2.511	3.849	1.622	10.803	1.920	1.464
	II	1.406	2.068	0.744	6.363	1.392	2.640	1.583	18.795	1.595	4.756	1.476	14.277	1.647	3.665	0.947	12.073	1.783	2.041
	III	4.322	2.256	0.655	6.456	2.469	2.739	1.960	9.289	2.240	4.034	2.380	11.089	1.509	2.980	0.902	9.184	1.593	1.712
Nf0	I	1.826	10.738	2.347	2.189	1.862	11.800	1.426	3.079	1.094	6.506	1.453	1.216	1.484	5.529	0.841	5.636		
	II	1.057	7.799	1.951	1.771	0.951	11.374	1.849	2.519	1.282	7.244	1.577	1.018	1.018	6.106	1.338	5.421		
	III	1.199	8.286	1.706	2.141	1.060	11.775	1.712	2.903	1.152	6.728	1.518	1.994	1.344	6.693	0.661	6.909		
Nf100	I	1.149	7.422	1.987	1.988	0.892	10.172	1.497	3.801	1.593	8.557	1.664	1.876	1.327	5.225	0.738	7.302		
	II	1.064	9.409	1.698	1.774	0.786	10.428	0.964	3.147	0.920	7.152	1.874	1.513	1.328	5.167	0.682	5.920		
	III	1.500	11.177	2.130	3.091	1.282	14.028	1.944	5.129	1.050	10.787	1.542	4.270	2.438	11.307	0.759	9.854		
Eav	I	1.237	8.914	2.118	1.175	1.350	10.330	1.623	2.034	1.506	10.627	1.822	0.559	1.928	4.776	0.738	4.644		
	II	1.471	11.268	2.233	2.286	1.219	15.858	1.763	3.414	1.461	14.401	1.329	3.591	1.875	11.328	0.656	5.827		
	III	1.248	9.783	2.246	1.849	1.536	12.997	2.129	3.750	1.057	9.285	1.448	4.398	1.882	8.337	0.901	7.224		
Ebo	I	3.748	4.563	2.796	1.317	0.911	9.757	1.219	2.267	0.837	5.988	1.715	1.349	1.225	4.201	0.594	6.243		
	II	1.371	8.106	2.229	1.594	1.056	10.293	1.604	3.194	1.508	7.309	1.628	0.554	1.512	7.535	0.755	6.356		
	III	1.806	9.477	2.269	2.082	1.485	13.379	2.706	4.986	1.567	12.058	1.765	2.198	1.530	8.618	0.916	14.100		
RSU	I	2.070	16.012	2.570	2.085	1.915	13.909	2.613	2.351	2.213	9.546	2.091	1.926	2.492	6.896	1.296	5.802		
	II	1.433	11.950	2.059	2.772	1.479	17.660	1.598	2.468	1.441	10.205	1.505	1.797	1.528	6.576	0.890	8.853		
	III	1.631	12.358	2.391	2.427	1.089	13.094	3.026	8.287	2.321	12.898	1.731	5.668	1.539	10.101	0.968	7.588		

7.14 - Registos das incubações laboratoriais e extracções químicas

Quadro A.7.14 - Resultados dos métodos laboratoriais e suas variantes

Ano	Prof.	(cm)	Tratamento	KCl _f		KCl _q		(B-A)		TFB		(D-A)		Ac		Ac _{sr}		N Kjel		I. an _{dd}		(I-A)		I. an _{dex}		MTA		MTA _{sr}		I. aer.			
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
				-----mg kg ⁻¹ -----		-----mg kg ⁻¹ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----		-----N-NH ₃ -----			
1997	0-14		testemunha	114.2	121.1	6.9	195.0	80.8	17.503	16.454	1.33	113.3	-0.8	41.7	169.7	157.0	73.822	68.188															
			ureia	121.7	153.3	31.7	197.5	75.8	40.823	25.956	1.36	167.3	45.7	90.0	348.4	334.0	203.930	193.631															
			est. aviário	130.0	136.7	6.7	201.3	71.3	27.735	20.412	1.33	168.0	38.0	65.0	249.7	236.0	104.522	92.555															
			est. bovino	126.7	126.7	0.0	200.0	73.3	18.209	16.876	1.33	133.3	6.7	58.3	230.8	216.9	94.558	84.917															
14-30		fertor	127.5	127.8	0.3	196.3	68.8	20.032	19.339	1.33	134.0	6.5	40.0	7.9	-5.7	26.960	16.433																
		testemunha	112.5	115.6	3.1	186.3	73.8	18.348	17.448	1.20	112.7	0.2	33.3	205.9	191.4	87.562	80.591																
30-60		testemunha	68.3	66.7	-1.7	127.5	59.2	8.631	7.973	0.73	66.0	-2.3	13.3	191.6	178.3	60.176	55.734																
		testemunha	123.3	130.0	6.7	205.0	81.7	11.489	10.797	1.37	125.0	1.7	40.0	207.4	189.3	119.160	114.881																
1998	0-14		ureia	133.3	151.7	18.3	217.5	84.2	25.945	21.551	1.38	153.3	20.0	81.7	264.2	249.5	198.840	192.517															
			est. aviário	136.7	140.0	3.3	222.5	85.8	16.843	15.088	1.29	140.0	3.3	60.0	189.3	173.8	119.576	108.253															
			est. bovino	130.0	130.0	0.0	215.0	85.0	11.601	10.894	1.32	138.3	8.3	55.0	188.6	173.3	108.256	102.449															
			fertor	130.0	133.3	3.3	210.0	80.0	11.987	11.459	1.35	131.7	1.7	43.3	61.9	46.9	99.870	94.948															
14-30		testemunha	133.3	133.3	0.0	210.0	76.7	12.969	12.396	1.35	130.0	-3.3	46.7	149.3	134.2	116.920	112.872																
		testemunha	80.0	80.0	0.0	152.5	72.5	5.563	4.990	0.76	69.2	-10.8	21.7	123.7	108.6	76.750	71.209																

KCl_f - Solução salina de KCl a frio (método de referência)

KCl_q - Método KCl a quente (4 horas a 100 °C)

TFB - Método do tampão fosfato/borato

Ac - Método do autoclave sem subtracção do N-NH₄⁺ inicial

Ac_{sr} - Método do autoclave com subtracção do N-NH₄⁺ inicial

N Kjel - Azoto determinado pelo método Kjeldhal

I. an_{dd} - Incubação anaeróbia (destilação directa da mistura solo/solução)

I. an_{dex} - Incubação anaeróbia (destilação dos extractos)

MTA - Incubação aeróbia com membranas de troca sem subtracção do N mineral inicial

MTA_{sr} - Incubação aeróbia com membranas de troca com subtracção do N mineral inicial

I. aer. - Incubação aeróbia com areia sem subtracção do N mineral inicial

I. aer._{sr} - Incubação aeróbia com areia com subtracção do N mineral inicial

7.15 – Resultados de análise de variância

7.15.1 – Produção de tubérculos

Ensaio de 1996

Origem da variação	S Q	G L	Q M	F calc.
Bloco (B)	157,348	2	78,674	
N fundo (Nf)	455,820	7	65,117	2,510 *
Erro macro-parcela, BNf	363,180	14	25,941	
N cobertura (Nc)	588,847	3	196,282	7,909 ***
Nf x Nc	901,719	21	42,939	1,730 *
Erro micro-parcela, BNf + B(Nf x Nc)	1191,252	48	24,818	

Ensaio de 1997

Origem da variação	S Q	G L	Q M	F calc.
Bloco (B)	1945,084	2	972,542	
N fundo (Nf)	3895,579	7	556,511	11,61 ***
Erro macro-parcela, BNf	671,232	14	47,945	
N cobertura (Nc)	1481,941	3	493,980	26,681 ***
Nf x Nc	598,886	21	28,518	1,540 (ns)
Erro micro-parcela, BNf + B(Nf x Nc)	888,681	48	18,514	

Ensaio de 1998

Origem da variação	S Q	G L	Q M	F calc.
Bloco (B)	529,089	2	264,545	
N fundo (Nf)	922,144	7	131,735	2,817 ***
Erro macro-parcela, BNf	654,712	14	46,765	
N cobertura (Nc)	1475,522	4	368,881	32,544 ***
Nf x Nc	810,698	28	28,952	2,544 ***
Erro micro-parcela, BNf + B(Nf x Nc)	725,437	64	11,335	

*** - $p < 0,01$; ** - $p < 0,05$; * - $p < 0,10$; ns - $p \geq 0,10$

7.15.2 - % de azoto total nos tubérculos

Ensaio de 1996

Origem de variação	S Q	G L	Q M	F cal.
Blocos (B)	0,343	2	0,172	
N fundo (Nf)	4,681	7	0,669	31,857***
Erro macro-parcela (BxNf)	0,289	14	0,021	
N cobertura (Nc)	0,376	3	0,125	8,492***
Nf x Nc	0,272	21	0,013	0,876 (ns)
Erro micro-parcela (B x Nc + B x (Nf x Nc))	0,709	48	0,015	

Ensaio de 1997

Origem de variação	S Q	G L	Q M	F cal.
Blocos (B)	0,262	2	0,131	
N fundo (Nf)	1,473	7	0,210	7,241***
Erro macro-parcela (BxNf)	0,409	14	0,029	
N cobertura (Nc)	0,446	3	0,149	6,944***
Nf x Nc	0,219	21	0,010	0,488 (ns)
Erro micro-parcela (B x Nc + B x (Nf x Nc))	1,027	48	0,021	

Ensaio de 1998

Origem de variação	S Q	G L	Q M	F. cal.
Blocos (B)	0,435	2	0,218	
N fundo (Nf)	3,569	7	0,510	18,889***
Erro macro-parcela (BxNf)	0,376	14	0,027	
N cobertura (Nc)	2,625	4	0,656	19,262***
Nf x Nc	0,727	28	0,026	0,762 (ns)
Erro micro-parcela (B x Nc + B x (Nf x Nc))	2,181	64	0,034	

7.15.3 – Azoto exportado*Ensaio de 1996*

Origem de variação	S Q	G L	Q M	F. cal.
Blocos (B)	901,782	2	450,891	
N fundo (Nf)	87643,046	7	12520,435	26,918***
Erro macro-parcela (BxNf)	6511,745	14	465,125	
N cobertura (Nc)	16629,520	3	5543,173	12,338***
Nf x Nc	14782,707	21	703,938	1,567 (ns)
Erro micro-parcela (B x Nc + B x (Nf x Nc))	21564,726	48	449,265	

Ensaio de 1997

Origem de variação	S Q	G L	Q M	Fcal
Blocos (B)	5552,390	2	2776,195	
N fundo (Nf)	79635,027	7	11376,432	19,121***
Erro macro-parcela (BxNf)	8329,484	14	594,963	
N cobertura (Nc)	24433,529	3	8144,510	13,359***
Nf x Nc	7281,976	21	346,761	0,569 (ns)
Erro micro-parcela (B x Nc + B x (Nf x Nc))	29264,521	48	609,678	

Ensaio de 1998

Origem de variação	S Q	G L	Q M	Fcal
Blocos (B)	814,460	2	407,230	
N fundo (Nf)	58149,424	7	8307,061	8,610***
Erro macro-parcela (BxNf)	13507,122	14	964,794	
N cobertura (Nc)	59864,486	4	14966,122	43,857***
Nf x Nc	16718,028	28	597,072	1,750**
Erro micro-parcela (B x Nc + B x (Nf x Nc))	21838,789	64	341,231	

7.15.4 – Taxa de cobertura. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	Dias após emergência					
	12	14	18	27	35	41
1997		0,000		0,000		0,000
1998	0,001		0,000		0,000	

7.15.5 – Altura das plantas. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	Dias após emergência					
	12	14	18	27	35	41
1997		0,001		0,001		0,000
1998	0,000		0,006		0,000	

7.15.6 – Nitratos nos pecíolos. Valores de probabilidade (*p*) associada à análise de variância

Ano	Dias após emergência								
	10	15	18	20	28	34	35	42	48
1996				0,000			0,000		0,000
1997		0,000			0,000			0,000	
1998	0,000		0,000			0,000			

7.15.7 – Azoto total nas folhas. Valores de probabilidade (*p*) associada à análise de variância

Ano	Dias após emergência								
	10	15	18	20	28	34	35	42	48
1996				0,000			0,000		0,000
1997		0,000			0,000			0,000	
1998	0,000		0,000			0,000			

7.15.8 – Clorofila SPAD. Valores de probabilidade (*p*) associada à análise de variância

Ano	Dias após emergência			
	10	18	34	42
1997				0,000
1998	0,024	0,004	0,000	

7.15.9 – Nitratos no solo durante a estação de crescimento. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	Dias após emergência					
	10	15	18	28	34	42
1997		0,000		0,044		0,000
1998	0,000		0,000		0,038	

7.15.10 – N inorgânico no solo durante a estação de crescimento. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	Dias após emergência					
	10	15	18	28	34	42
1997		0,000		0,036		0,036
1998	0,036		0,036		0,013	

7.15.11 – N inorgânico no solo no Outono. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)			N-NO ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)			N-Nmin. (mg kg ⁻¹)		
	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm
1996	0,001	0,046	0,002						
1997	0,141	0,061	0,072	0,071	0,657	0,720	0,312	0,055	0,116
1998	0,051	0,019	0,019	0,390	0,146	0,194	0,059	0,020	0,022

7.15.12 – Análise de plantas da cultura intercalar. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	Fevereiro		Abril		
	N nas plantas	N-NO ₃ ⁻ pecíolos	Biomassa	N nas plantas	N exportado
1996/97	0,796	0,771	0,399	0,638	0,335
1997/98	0,158	0,109	0,516	0,818	0,306
1998/99	0,014	0,276	0,043	0,983	0,032

7.15.13 – Azoto inorgânico residual em Abril em solo nu. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)			N-NO ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)			N-Nmin. (mg kg ⁻¹)		
	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm
1996/97	0,433	0,068	0,185						
1997/98	0,525	0,643	0,739	0,225	0,569	0,335	0,650	0,797	0,738
1998/99	0,730	0,803	0,814	0,072	0,369	0,124	0,634	0,760	0,839

7.15.14 – Azoto inorgânico residual em Abril sob a cultura intercalar. Valores de probabilidade (*p*) associados à análise de variância

Ano	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)			N-NO ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)			N-Nmin. (mg kg ⁻¹)		
	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm
1996/97	0,654	0,654	0,584						
1997/98	0,927	0,679	0,959	0,569	0,750	0,867	0,931	0,704	0,963
1998/99	0,135	0,111	0,078	0,900	0,747	0,854	0,349	0,441	0,094

7.15.15 – Azoto inorgânico residual em Abril em solo nu e sob a cultura intercalar. Valores de probabilidade associados ao teste t-Student

Ano	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)			N-NO ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)			N-Nmin. (mg kg ⁻¹)		
	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-60 cm
1996/97	0,000	0,000	0,000						
1997/98	0,000	0,000	0,000	0,785	0,865	0,760	0,000	0,000	0,000
1998/99	0,000	0,000	0,000	0,655	0,012	0,183	0,000	0,000	0,000

7.15.16 – Incubação *in situ*. N-NH₄⁺ no solo. Probabilidade associada à análise de variância (*p*) e comparação múltipla de médias

Ensaio de 1997

	Períodos de incubação								
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,000	0,392	0,284	0,111	0,346	0,596	0,190	0,190	0,195
N _f 0	b*								
N _f 100	a								
Eav	b								
Ebo	b								
RSU	b								

* - Na coluna, médias com a mesma letra não são estatisticamente significativas pelo teste Fisher' LSD ($\alpha < 0,05$)

Ensaio de 1998

	Períodos de incubação								
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,005	0,001	0,287	0,955	0,007	0,093	0,162	0,441	0,399
N _f 0	b	b			b				
N _f 100	a	a			b				
Eav	b	b			a				
Ebo	b	b			a				
RSU	b	b			a				

7.15.17 – Incubação *in situ*. N-NO₃⁻ no solo. Probabilidade associada à análise de variância (*p*) e comparação múltipla de médias

Ensaio de 1996

	Períodos de incubação										
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11
<i>p</i>	0,018	0,016	0,831	0,204	0,204				0,158	0,761	0,239
N _f 0	b	bc									
N _f 100	a	a									
Eav	a	ab									
Ebo	b	ab									
RSU	b	c									

Ensaio de 1997

	Períodos de incubação								
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,000	0,000	0,001	0,078	0,372	0,173	0,445	0,414	0,901
N _f 0	b*	bc	c						
N _f 100	a	a	a						
Eav	b	b	b						
Ebo	b	bc	bc						
RSU	b	c	bc						

Ensaio de 1998

	Períodos de incubação								
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,032	0,000	0,020	0,488	0,496	0,234	0,629	0,196	0,335
N _f 0	b	b	bc						
N _f 100	a	a	a						
Eav	b	b	a						
Ebo	b	b	c						
RSU	b	b	ab						

7.15.18 – Incubação *in situ*. Taxa de amonificação. Probabilidade associada à análise de variância (*p*) e comparação múltipla de médias

Ensaio de 1997

	Ponto médio dos períodos de incubação							
	d1-d2	d2-d3	d3-d4	d4-d5	d5-d6	d6-d7	d7-d8	d8-d9
<i>p</i>	0,000	0,552	0,919	0,255	0,423	0,749	0,365	0,697
N _f 0	b							
N _f 100	a							
Eav	b							
Ebo	b							
RSU	b							

Ensaio de 1998

	Ponto médio dos períodos de incubação							
	d1-d2	d2-d3	d3-d4	d4-d5	d5-d6	d6-d7	d7-d8	d8-d9
<i>p</i>	0,013	0,001	0,115	0,706	0,326	0,459	0,725	0,442
N _f 0	b	b						
N _f 100	a	a						
Eav	b	c						
Ebo	b	bc						
RSU	b	bc						

7.15.19 – Incubação *in situ*. Taxa de nitrificação. Probabilidade associada à análise de variância (*p*) e comparação múltipla de médias

Ensaio de 1996

	Ponto médio dos períodos de incubação						
	d1-d2	d2-d3	d3-d4	d4-d5	d5-d6	d9-d10	d10-d11
<i>p</i>	0,089	0,115	0,151	0,210	0,036	0,142	0,738
N _f 0					b		
N _f 100					a		
Eav					a		
Ebo					a		
RSU					a		

Ensaio de 1997

	Ponto médio dos períodos de incubação							
	d1-d2	d2-d3	d3-d4	d4-d5	d5-d6	d6-d7	d7-d8	d8-d9
<i>p</i>	0,066	0,380	0,096	0,888	0,031	0,582	0,330	0,591
N _f 0					c			
N _f 100					ab			
Eav					bc			
Ebo					c			
RSU					a			

Ensaio de 1998

	Ponto médio dos períodos de incubação							
	d1-d2	d2-d3	d3-d4	d4-d5	d5-d6	d6-d7	d7-d8	d8-d9
<i>p</i>	0,000	0,001	0,058	0,354	0,081	0,157	0,109	0,953
N _f 0	c	b						
N _f 100	a	a						
Eav	b	b						
Ebo	bc	b						
RSU	b	b						

7.15.20 – Incubação *in situ*. N-NH₄⁺ acumulado. Probabilidade associada à análise de variância (*p*) e comparação múltipla de médias

Ensaio de 1997

	Períodos de incubação							
	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N _f 0	b	b	b	b	b	b	b	b
N _f 100	a	a	a	a	a	a	a	a
Eav	b	b	b	b	b	b	b	b
Ebo	b	b	b	b	b	b	b	b
RSU	b	b	b	b	b	b	b	b

Ensaio de 1998

	Períodos de incubação							
	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,013	0,006	0,005	0,005	0,006	0,007	0,007	0,011
N _f 0	b	b	b	b	b	b	b	b
N _f 100	a	a	a	a	a	a	a	a
Eav	b	b	b	b	b	b	b	b
Ebo	b	b	b	b	b	b	b	b
RSU	b	b	b	b	b	b	b	b

7.15.21 – Incubação *in situ*. N-NO₃⁻ acumulado. Probabilidade associada à análise de variância (*p*) e comparação múltipla de médias

Ensaio de 1996

	Períodos de incubação									
	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11
<i>p</i>	0,089	0,086	0,074	0,017	0,022				0,000	0,000
N _f 0				bc	bc				c	c
N _f 100				a	a				a	a
Eav				a	ab				b	b
Ebo				bc	bc				c	c
RSU				c	c				d	d

Ensaio de 1997

	Períodos de incubação							
	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,066	0,156	0,036	0,067	0,041	0,062	0,037	0,055
N _f 0			b		b		b	
N _f 100			a		a		a	
Eav			ab		ab		ab	
Ebo			b		b		b	
RSU			b		b		ab	

Ensaio de 1998

	Períodos de incubação							
	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,006
N _f 0	c	b	b	b	bc	b	c	b
N _f 100	a	a	a	a	a	a	a	a
Eav	b	b	b	b	b	b	b	b
Ebo	bc	b	b	b	c	b	c	b
RSU	bc	b	b	b	bc	b	bc	b

7.16 – Elementos matemáticos de implementação do modelo exponencial modificado

7.16.1 - Determinação da constante a

A constante a assume nove valores arbitrários pré-determinados a partir da equação

$$a = 4 \ln(c)/N_{max},$$

em que, c toma os valores 0,03, 0,05, 0,10, 0,20, 0,35, 0,60, 0,90, 1,50 e 2,70 e N_{max} tomou os valores 500, 300 e 200 kg N ha⁻¹ para as equações em que se considerou todo o azoto aplicado, as aplicações de fundo e as aplicações de cobertura, respectivamente.

Assim, os valores de a foram:

$$N_{max} = 500 \text{ kg N ha}^{-1} \\ -0,0351, -0,0240, -0,0184, -0,0129, -0,0084, -0,0041, -0,0008, 0,0032 \text{ e } 0,0079;$$

$$N_{max} = 300 \text{ kg N ha}^{-1} \\ -0,0468, -0,0399, -0,0307, -0,0215, -0,0140, -0,0068, -0,0014, 0,0054 \text{ e } 0,0132;$$

$$N_{max} = 200 \text{ kg N ha}^{-1} \\ -0,0701, -0,0599, -0,0461, -0,0322, -0,0210, -0,0102, -0,0021, 0,0081 \text{ e } 0,0199.$$

7.16.2 - Equações de ajustamento para a relação entre o azoto aplicado e a produção de tubérculos

Aplicações de fundo

$$Y_{(1996)} = 43,329 + 0,038 N - 0,598 \text{ EXP}(-0,0399 N); R^2 = 0,906 \\ Y_{(1997)} = 78,493 - 0,071 N - 54,931 \text{ EXP}(-0,0068 N); R^2 = 0,992 \\ Y_{(1998)} = 384,901 - 0,349 N - 353,478 \text{ EXP}(-0,0014 N); R^2 = 0,935$$

Aplicações de cobertura

N_f0

$$Y_{(1996)} = 49,061 + 0,177 N - 6,851 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,978 \\ Y_{(1997)} = 33,994 + 0,310 N - 9,782 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,980 \\ Y_{(1998)} = 42,311 + 0,021 N - 10,115 \text{ EXP}(-0,0599 N); R^2 = 0,951$$

N_f50

$$Y_{(1996)} = 49,430 + 0,184 N - 6,535 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,872 \\ Y_{(1997)} = 42,122 + 0,197 N - 6,705 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,956 \\ Y_{(1998)} = 58,559 - 0,066 N - 23,653 \text{ EXP}(-0,021 N); R^2 = 0,875$$

N_f100

$$Y_{(1996)} = 53,971 + 0,185 N - 6,568 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,645$$

$$Y_{(1996)} = 49,619 + 0,050 N; R^2 = 0,320 (p = 0,188)$$

$$Y_{(1997)} = 41,378 + 0,047 N - 0,761 \text{ EXP}(-0,0701 N); R^2 = 0,958$$

$$Y_{(1998)} = 47,625 + 0,025 N - 2,464 \text{ EXP}(-0,0599 N); R^2 = 0,985$$

N_f200

$$Y_{(1996)} = 48,557 + 0,074 N; R^2 = 0,472 (p = 0,195)$$

$$Y_{(1997)} = 48,392 + 0,033 N; R^2 = 0,223 (p = 0,527)$$

$$Y_{(1998)} = 46,821 - 0,004 N; R^2 = 0,000 (p = 0,751)$$

N_f300

$$Y_{(1996)} = 54,162 - 0,054 N; R^2 = 0,483 (p = 0,190)$$

$$Y_{(1997)} = 48,418 + 0,042 N; R^2 = 0,457 (p = 0,201)$$

$$Y_{(1998)} = 48,273 + 0,001 N; R^2 = 0,000 (p = 0,969)$$

Eav

$$Y_{(1996)} = 52,014 - 0,008 N - 4,108 \text{ EXP}(-0,021 N); R^2 = 0,247$$

$$Y_{(1997)} = 35,953 + 0,078 N - 3,711 \text{ EXP}(-0,0701 N); R^2 = 0,989$$

$$Y_{(1998)} = 36,527 + 0,106 N - 0,157 \text{ EXP}(0,0199 N); R^2 = 0,940$$

Ebo

$$Y_{(1996)} = 50,065 + 0,217 N - 6,904 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,979$$

$$Y_{(1997)} = 37,897 + 0,348 N - 12,413 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,966$$

$$Y_{(1998)} = 48,433 - 0,007 N - 11,926 \text{ EXP}(-0,0322 N); R^2 = 0,860$$

RSU

$$Y_{(1996)} = 48,108 + 0,037 N - 6,207 \text{ EXP}(-0,0701 N); R^2 = 0,961$$

$$Y_{(1997)} = 33,302 + 0,173 N - 4,248 \text{ EXP}(0,0081 N); R^2 = 0,989$$

$$Y_{(1998)} = 76,256 - 0,116 N - 45,095 \text{ EXP}(-0,0102 N); R^2 = 0,919$$

7.17 - Incubações laboratoriais e extracções químicas

Quadro A.7.17 - Efeito dos fertilizantes. Coeficientes de determinação e probabilidades associadas à análise de variância da regressão

		Coeficiente de determinação (r^2)																
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
	A		0,15	0,05	0,64	0,05	0,02	0,01	0,06	0,15	0,00	0,05	0,00	0,01	0,03	0,02	0,40	0,06
P	B	0,265		0,65	0,13	0,03	0,51	0,39	0,16	0,63	0,50	0,79	0,37	0,36	0,78	0,74	0,78	0,93
r	C	0,530	0,005		0,02	0,01	0,70	0,53	0,33	0,36	0,54	0,63	0,49	0,37	0,69	0,65	0,24	0,74
o	D	0,731	0,301	0,006		0,59	0,10	0,13	0,03	0,01	0,04	0,04	0,00	0,00	0,13	0,14	0,45	0,11
b	E	0,529	0,630	0,916	0,009		0,15	0,22	0,00	0,06	0,13	0,00	0,03	0,03	0,16	0,20	0,17	0,07
a	F	0,728	0,020	0,002	0,363	0,269		0,91	0,08	0,63	0,82	0,68	0,39	0,10	0,34	0,27	0,11	0,51
b	G	0,772	0,054	0,017	0,307	0,172	0,000		0,06	0,48	0,62	0,55	0,01	0,23	0,19	0,13	0,22	0,37
i	H	0,484	0,259	0,081	0,640	0,984	0,432	0,508		0,03	0,08	0,07	0,08	0,08	0,28	0,32	0,12	0,16
l	I	0,274	0,006	0,068	0,792	0,483	0,006	0,027	0,646		0,87	0,70	0,35	0,35	0,37	0,31	0,28	0,54
i	J	0,952	0,022	0,015	0,561	0,304	0,000	0,007	0,436	0,000		0,66	0,39	0,46	0,35	0,29	0,11	0,48
d	K	0,517	0,001	0,006	0,607	0,885	0,003	0,014	0,451	0,003	0,004		0,65	0,65	0,74	0,65	0,40	0,73
a	L	0,806	0,064	0,025	0,893	0,632	0,052	0,155	0,436	0,073	0,033	0,005		1,00	0,66	0,56	0,08	0,36
d	M	0,797	0,065	0,025	0,909	0,646	0,049	0,146	0,443	0,072	0,031	0,005	0,000		0,65	0,56	0,08	0,36
e	N	0,664	0,001	0,003	0,316	0,246	0,078	0,205	0,119	0,063	0,070	0,001	0,005	0,005		0,98	0,50	0,77
(p)	O	0,667	0,001	0,005	0,282	0,200	0,128	0,302	0,088	0,097	0,108	0,005	0,013	0,013	0,000		0,51	0,73
	P	0,046	0,002	0,148	0,034	0,242	0,344	0,349	0,314	0,114	0,358	0,050	0,424	0,429	0,022	0,020		0,65
	Q	0,490	0,000	0,001	0,357	0,461	0,021	0,063	0,257	0,020	0,026	0,002	0,065	0,066	0,001	0,002	0,005	

A - KCl a frio (método de referência)

B - KCl a quente, variante sem subtracção da referência

C - KCl a quente, variante com subtracção da referência (B-A)

D - Tampão fosfato borato, variante sem subtracção da referência

E - Tampão fosfato borato, variante com subtracção da referência (D-A)

F - Autoclave, variante sem subtracção do NH_4^+ inicial

G - Autoclave, variante com subtracção do NH_4^+ inicial

H - N total, determinação pelo método Kjeldhal

I - Incubação anaeróbia, variante de destilação directa das misturas solo/solução

J - Incubação anaeróbia, variante com subtracção da referência (I-A)

K - Incubação anaeróbia, variante da destilação do extracto

L - Membrã de troca aniónica, variante sem subtracção do NO_3^- inicial

M - Membrã de troca aniónica, variante com subtracção do NO_3^- inicial

N - Incubação aeróbia, variante sem subtracção do N mineral inicial

O - Incubação aeróbia, variante com subtracção do N mineral inicial

P - Incubação in situ (N-NO_3^- acumulado)

Q - Azoto exportado pelos tubérculos

