



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Lixiviação de Nitratos

em Fertirregação Localizada

*Tese de dissertação submetida para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia do Solo e da Água*

José Carlos Correia Tomás

Évora

2001

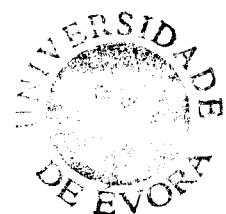


UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Lixiviação de Nitratos

em Fertirregação Localizada

*Tese de dissertação submetida para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia do Solo e da Água*



142294

José Carlos Correia Tomás

Évora

2001

A meus pais

Agradecimentos:

À Eng^a. Agr^a Josefina Correia Mariano por desde a primeira hora ter apoiado a frequência deste Curso de Mestrado.

Ao Professor Alfredo Gonçalves Ferreira por ter aceitado a orientação desta Tese e por toda a sua sempre disponibilidade para prestar preciosas indicações no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Ricardo Serralheiro, pelo apoio e interesse com que acompanhou todo o meu processo.

À Eng^a. Téc. Agr^a. Maria da Fé Candeias, pelo apoio prestado no âmbito da realização das determinações de nitratos no laboratório, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

À Dra. Corina Carranca, por toda a colaboração prestada, nomeadamente pelo material bibliográfico que disponibilizou e pelo apoio prestado no ensaio.

Ao Professor João Tiago Mexia, pela preciosa ajuda que me proporcionou na interpretação estatística dos resultados obtidos, assim como aos seus alunos.

À Eng^a. Manuela Rosa por todo o apoio prestado durante todo o Curso.

Aos meus colegas de Curso pela amizade e companheirismo.

A todos os que contribuíram para a realização deste trabalho.

Financiamentos:

Este trabalho foi possível realizar devido ao apoio financeiro dos projectos:

- INTERREG II – “Efeito do uso intensivo de fertilizantes e de produtos fitossanitários na qualidade do solo e das águas subterrâneas”
- INTERREG IIC – “Estudo do movimento da água no solo num sistema de regagota-a-gota”

Resumo

Os elevados teores de nitratos nas águas subterrâneas têm gerado preocupações a nível da União Europeia que criou legislação apropriada para os nitratos de origem agrícola, tendo Portugal já delimitado uma Zona Vulnerável no Algarve, na Campina de Faro.

Atendendo a que a cultura de regadio predominante no Algarve é a citricultura, com a quase totalidade da área a ser regada através de rega localizada, e em que a fertilização é realizada por fertirrega de alta frequência, julgou-se interessante a realização de um trabalho de monitorização sobre essa situação, bastante generalizada na região.

O trabalho realizou-se num ensaio de laranjeiras instalado em Abril de 1999, regado por gota-a-gota, através de um sistema automatizado de controlo da rega e da fertilização, tendo-se estudado a lixiviação do azoto sob a forma de nitratos (N-NO_3^-), resultante da aplicação de 3 níveis de fertilização azotada, em que as quantidades de azoto aplicadas durante o ano de 2000 foram de 15, 60 e 240 gramas por planta e por ano, para os três níveis, sendo as dotações de regas iguais nos 3 níveis.

As regas foram diárias no verão e as fertirregas realizaram-se praticamente sempre que se regava.

Monitorou-se o teor de humidade do solo, às profundidades de 10, 30, 60 e 90 cm, através de sonda TDR e de uma sonda capacitiva. Recolheu-se a solução do solo, através de cápsulas de sucção instaladas a 30 e a 90 cm de profundidade, para determinação das respectivas concentrações de nitratos em laboratório.

Acompanhou-se a evolução da concentração dos nitratos no período do outono-inverno, de Outubro a Fevereiro, e durante o período em que decorreu a fertirrega, de Março a Setembro. Monitorou-se também o teor de humidade do solo para determinação da drenagem, causada pela precipitação e pelas regas, para conjuntamente com as concentrações de nitratos da solução do solo se calcular as quantidades lixiviadas de N-NO_3^- .

Observou-se que a gestão de regas é extremamente importante no processo, pois como o número de gotejadores é fixo, as maiores dotações de rega correspondem a maiores profundidades alcançadas pela frente de humedecimento que poderão ser já abaixo da zona de enraizamento, podendo ocorrer perdas por percolação profunda e lixiviação.

Observou-se que no primeiro nível de fertilização as concentrações dos nitratos na solução do solo foram inferiores a 50 mg/l e que a lixiviação do N-NO_3^- foi de cerca de 0.47 % das quantidades aplicadas.

No segundo nível de fertilização conduziu a valores relativamente reduzidos de lixiviação de azoto sob a forma nítrica N-NO_3^- , cerca de 2.1 % do total do azoto aplicado e em que as concentrações de nitratos na água de rega não excederam muitas vezes as 100 mg/l, o que significa que poderá ser um bom valor para situações similares.

O terceiro nível conduziu a valores superiores a 600 mg/l de concentração de dos nitratos na solução do solo, traduzindo uma taxa de aplicação excessiva.

Abstract

High concentrations of nitrate in groundwater are a great concern in the European Union. For this purpose legislation for the nitrates from agricultural activities was put forward.

The portuguese government was delimited a Vulnerable Zone in the Algarve, in the Campina de Faro.

The citrus crop is the main irrigation crop of the Algarve almost of the crop area is irrigated with trickle irrigation and the fertilisation is by fertigation. In order to evaluate their monitoring was carried out.

The experiments were carried id the year 2000 in a citrus orchard planted in April 1999. The irrigation and the fertilisation were a automated trickle irrigation system. It was studied the nitrate leaching associated to a fertilisation regime of three levels of nitrogen (15, 60 and 240 g per tree). In addition, the irrigation was similar on the 3 nitrogen levels tested.

The irrigation was done daily in the summer and the fertigations was carried on all irrigations almost.

The soil water content was monitored at 10, 30, 60 and 90 cm depth and the soil solution was collected in ceramic suction cups at 30 and 90 cm depth, to determine the nitrate content in the laboratory.

W have followed the evolution of the nitrate concentration in the soil solution during the period autumn-winter and during the fertigation period which was from March to September. The drainage was determined from a water balance and the leaching of nitrates was calculated from the drainage below the root zone and the nitrate concentration observed on this zone.

It was observed that the management of the irrigation was very important in the process, since the greater irrigation events were associated to the greater duration of irrigations. The wet-front reached a depth below the root zone where maybe occurs water losses for deep percolation and leaching.

It was observed that the nitrate concentrations of the soil solution from the first level of fertilisation did not exceed 50 mg and the leaching of N-NO_3^- was about 0.47% of the total applied.

It addition, on the second level of N fertilisation, the N-NO₃⁻ leached was low, only 2.1 % of the total N amount. Nitrates concentrations in the soil solution did not exceeded the 100 mg/l which maybe a good indicator for similar situations.

However, nitrate concentrations exceeding 600 mg/l in the soil solution were observed from the third level of N fertilisation and this result is maybe an application in excess.

Índice

Agradecimentos.....	v
Financiamentos.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	xi
1. Introdução.....	1
1.1 A Zona Vulnerável da Campina de Faro.....	3
1.2 Prováveis novas Zonas Vulneráveis a delimitar no Algarve.....	4
1.3 Organização da tese.....	5
2. O azoto nos solos agrícolas.....	7
2.1 Ciclo do azoto.....	8
2.2 Mineralização do azoto.....	10
2.2.1 Aminização.....	11
2.2.2 Amonificação.....	12
2.2.3 Nitrificação.....	12
2.3 Imobilização.....	14
2.4 Fixação simbiótica.....	15
2.5 Desnitrificação.....	15
2.6 Volatilização da amónia.....	17
2.7 Lixiviação do azoto.....	17
2.7.1. Expressão da convecção-difusão.....	18
2.7.2 Influência da utilização dos fertilizantes azotados.....	20
2.7.3 Influência da rega e da drenagem.....	23
2.7.3.1 Influência do método de rega na lixiviação de nitratos.....	23
2.7.3.2 Influência da drenagem.....	24
2.7.4 Factores climáticos.....	24
2.7.5 Influência das propriedades do solo.....	25

2.7.6 Influência dos macroporos através do escoamento preferencial.....	26
2.7.6.1 Influência do tipo de mobilização na formação de macroporos.....	28
2.7.7 Influência do tipo de coberto vegetal.....	29
2.7.8 Metodologias utilizadas para a monitorização da lixiviação de nitratos.....	30
3. Aspectos hidrodinâmicos da água no solo.....	35
3.1 Teor de humidade do solo.....	36
3.1.1 Formas de exprimir o teor de humidade do solo.....	36
3.1.2 Determinação do teor de humidade do solo.....	37
3.2 Potencial da água no solo.....	40
3.1.1 Perfis de carga.....	40
3.3 Retenção de água no solo.....	41
3.4 Curvas características de humidade do solo.....	42
3.4.1 Relações entre o teor de humidade do solo e a força de retenção.....	44
3.5 Movimento da água no solo.....	45
3.5.1 Expressão geral do movimento da água no solo.....	46
3.5.2 Relações entre a condutividade hidráulica e o teor de humidade do solo.....	46
3.5.3 Movimento unidimensional vertical da água no solo em condições de saturação.....	50
3.5.4 Movimento unidimensional vertical da água no solo em condições de não saturação.....	52
3.6 Movimento da água no solo a partir de uma fonte pontual.....	54
3.5.1 Movimento dos solutos a partir de uma fonte pontual.....	57
3.7 Absorção da água pelas raízes.....	58
4. A rega gota a gota.....	61
4.1 Características hidráulicas dos aplicadores.....	63
4.2 Gestão da rega gota a gota.....	63
5. Fertirregação em sistemas de rega localizada.....	71
5.1 Formas de aplicação de fertilizantes na água de rega.....	71
5.2. O azoto na fertirregação localizada.....	72
5.3 Gestão da fertirregação.....	75
5.4 Adubos azotados mais utilizados em fertirregação.....	75
6. A rega gota-a-gota e a fertirregação azotada dos citrinos.....	79

6.1 A regagota a gota dos citrinos.....	80
6.1.1 Necessidades hídricas.....	80
6.1.2 Superfície a humedecer na rega localizada dos citrinos.....	82
6.2 A fertirrega azotada dos citrinos com rega localizada.....	84
6.2.1 Influência do material vegetal.....	90
6.2.2 Utilização de inibidores da nitrificação.....	90
7. Trabalhos de campo.....	91
7.1 Características do solo do ensaio.....	91
7.1.1 Descrição de um perfil do solo.....	92
7.1.1.1 Características físicas.....	93
7.1.1.2 Características químicas.....	96
7.2 Material e métodos.....	97
7.2.1 Regas e fertilizações.....	98
7.2.1.1 Sistema de rega.....	98
7.2.1.2 Dotações de rega.....	98
7.2.1.3 Fertilização.....	100
7.2.2 Metodologia utilizada para o cálculo das quantidades lixiviadas.....	103
7.2.2.1 Determinação da drenagem.....	104
7.2.2.2 Monitorização do teor de nitratos da solução do solo.....	106
7.3 Resultados e discussão.....	107
7.3.1 Precipitação e temperatura registadas.....	107
7.3.2 Drenagem.....	108
7.3.3 Concentração de nitratos na solução do solo.....	113
7.3.3.1 Evolução durante o período de outono-inverno de 1999-2000.....	113
7.3.3.2 Evolução durante a época de primavera-verão de 2000.....	118
7.3.4 Quantidades lixiviadas de N-NO ₃ ⁻	123
7.4 Análise estatística.....	125
7.4.1 Análise de erros.....	132
7.5 Conclusões.....	138
8. Perspectivas futuras.....	141
9. Referências bibliográficas.....	143

Índice de figuras

Figura 2.1 Ciclo do azoto.....	9
Figura 3.1 Perfis de carga.....	41
Figura 3.2 Curvas de tensão de humidade de vários solos, obtidas por dessecação.....	42
Figura 4.1 Volume de solo humedecido (Vm) correspondente a diferentes combinações de larguras e profundidades.....	67
Figura 7.1 Curvas características de humidade do solo do ensaio.....	95
Figura 7.2 Precipitações acumuladas e temperaturas médias registadas entre dois eventos de monitorização.....	108
Figura 7.3 Humedecimento do solo resultante de uma rega com 35 minutos de duração, correspondente a uma dotação de 4,4 l/planta/dia.....	111
Figura 7.4 Humedecimento do solo resultante de uma rega com 56 minutos de duração, correspondente a uma dotação de 7 l/planta/dia.....	111
Figura 7.5 Humedecimento do solo resultante de uma rega com 88 minutos de duração, correspondente a uma dotação de 11 l/planta/dia.....	111
Figura 7.6 Evolução do teor de humidade no perfil do solo durante e após uma rega 90 minutos de duração com um gotejador de débito de 3,8 l/h.....	112
Figura 7.7 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e Inverno, nos quatro pontos observados no nível 1.....	114
Figura 7.8 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e inverno, nos quatro pontos observados no nível 2.....	115
Figura 7.9 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e Inverno, nos quatro pontos observados no nível 3.....	116
Figura 7.10 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e Inverno, considerando os valores médios da cada nível de fertilização e o ponto onde não houve fertilização.....	117
Figura 7.11 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de fertirrega, nos quatro pontos observados no nível 1.....	118
Figura 7.12 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de fertirrega, nos quatro pontos observados no nível 2.....	120
Figura 7.13 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de	

fertirrega, nos quatro pontos observados no nível 3.....	121
Figura 7.14 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de Fertirrega, considerando os valores médios de cada nível de fertilização.....	122
Figura 7.15. Curvas de acumulação de nitratos no nível 1.....	126
Figura 7.16. Curvas de acumulação de nitratos no nível 2.....	126
Figura 7.17. Curvas de acumulação de nitratos no nível 3.....	126
Figura 7.18 Rectas resultantes da regressão linear das curvas totais e nitratos Acumulados no nível 1.....	128
Figura 7.19 Rectas resultantes da regressão linear das curvas totais e nitratos Acumulados no nível 2.....	128
Figura 7.20 Rectas resultantes da regressão linear das curvas totais e nitratos Acumulados no nível 3.....	128
Figura 7.21 Variação do parâmetro a da equação de regressão para 30 cm de Profundidade, nos 3 níveis de fertilização.....	129
Figura 7.22 Variação do parâmetro a da equação de regressão para 90 cm de Profundidade, nos 3 níveis de fertilização.....	130
Figura 7.23 Variação do parâmetro b da equação de regressão para 30 cm de Profundidade, nos 3 níveis de fertilização.....	130
Figura 7.24 Variação do parâmetro b da equação de regressão para 90 cm de Profundidade, nos 3 níveis de fertilização.....	131

Índice de quadros

Quadro 5.1 Características do nitrato de amónio.....	76
Quadro 5.2 Características do sulfato de amónio.....	76
Quadro 5.3 Características da ureia.....	77
Quadro 5.4 Características da solução N32.....	77
Quadro 5.5 Características do nitrato de potássio.....	78
Quadro 6.1 Quantidades de N admitidas para “Produção Integrada de citrinos”.....	88
Quadro 6.2 Fertilização azotada dos citrinos.....	89
Quadro 6.3 Fraccionamento da fertilização recomendado para citrinos.....	89
Quadro 7.1 Características físicas das amostras de solo não crivadas.....	93
Quadro 7.2 Características físicas das amostras crivadas (<2 mm).....	94
Quadro 7.3 Características químicas do solo.....	96
Quadro 7.4 Dotações de rega diárias em 1999.....	99
Quadro 7.5 Dotações de rega em 2000.....	100
Quadro 7.6 Fertilizações totais anuais.....	102
Quadro 7.7 Dotações de N aplicadas nos 3 níveis de fertilização (gramas/planta).....	102
Quadro 7.8 Concentrações de NO_3^- na água de rega nas fertirregas.....	102
Quadro 7.9 Dotações de P_2O_5 e K_2O aplicadas (gramas/planta).....	103
Quadro 7.10 Precipitação registada no período dos trabalhos de campo.....	107
Quadro 7.11 Drenagem ocorrida no período outono-inverno (mm).....	109
Quadro 7.12 Drenagem no período de fertirregua (mm).....	112
Quadro 7.13 Lixiviação de N-NO_3^- no período de outono/inverno (Kg/ha).....	124
Quadro 7.14 Lixiviação de N-NO_3^- no período de fertirregua (Kg/ha).....	124
Quadro 7.15 Parâmetros a e b das equações de acumulação de nitratos.....	127
Quadro 7.16 Número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão no Nível 1, para um intervalo de confiança de 95%.....	133
Quadro 7.17 Número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão no Nível 2, para um intervalo de confiança de 95%.....	134
Quadro 7.18 Número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão no Nível 3, para um intervalo de confiança de 95%.....	135
Quadro 7.19 Redução do erro num Intervalo de Confiança de 60%.....	136
Quadro 7.20 Redução do erro num Intervalo de Confiança de 70%.....	137

1. INTRODUÇÃO

A actividade agrícola intensiva de regadio é tida como uma das principais fontes de contaminação das águas subterrâneas devido à utilização de grandes quantidades de fertilizantes químicos e de pesticidas, associadas a intensos movimentos de água no solo. Tem assumido particular motivo de preocupações ambientais, nos últimos anos, a poluição difusa por nitratos das águas subterrâneas.

Os elevados teores de nitratos (NO_3^-) nas águas para abastecimento público têm gerado preocupações ao nível da saúde pública. Embora os nitratos não sejam considerados tóxicos para o Homem, é a sua redução, sob determinadas condições, a nitritos (NO_2^-) que provoca a toxicidade. Os nitratos ingeridos podem ser convertidos em nitritos nos fluidos salivares, pela microflora oral, ou no tracto gastrointestinal, pela flora gástrica. Os nitritos formados no estômago são absorvidos para a corrente sanguínea e ao combinarem-se com a hemoglobina tornam-na incapaz de absorver o oxigénio, provocando uma cianose, conhecida por Metamoglobinémia infantil, que é uma acumulação anormal de metamoglobinina nos glóbulos vermelhos, resultante da oxidação da hemoglobina. As crianças com menos de seis meses são as mais afectadas devido ao facto de haver nelas uma tendência para a existência de um fluido gástrico com pH mais elevado, promotor de um ambiente redutor no seu estômago. As grávidas e os hemodialisados são também grupos de risco. A norma portuguesa da qualidade da água define como valor máximo da concentração de nitratos recomendado (VMR) 25 mg/L e como valor máximo admissível (VMA) 50 mg/L.

Em meados da década de oitenta a Direcção Regional de Agricultura do Algarve (DRAALG) iniciou um processo de análise a amostras de águas subterrâneas de captações de agricultores da Campina de Faro, tendo sido determinados teores de nitratos bastante elevados, principalmente nas captações menos profundas, poços e noras, frequentemente com valores superiores a 100 mg/L.

Posteriormente através do Programa INTERREG I – “Efeitos do uso intensivo de fertilizantes e produtos fitossanitários na qualidade dos solos e das águas subterrâneas”, em

que participaram além da DRAALG, a Direcção Regional do Ambiente e a Universidade do Algarve essa rede de observações foi alargada, abrangendo outros concelhos do Algarve, tendo-se confirmado os resultados obtidos anteriormente pela DRAALG na Campina de Faro e encontrando-se também valores superiores às 50 mg/L noutros concelhos.

Durante a elaboração dos Planos Directores Municipais (PDM) de alguns municípios do litoral e do barrocal do Algarve foi prevista a protecção às zonas de recarga dos aquíferos, principalmente nas manchas de solos consideradas como de máxima infiltração, tendo as respectivas Comissões Técnicas de Acompanhamento tentado regulamentar as práticas culturais nas zonas mais sensíveis. Por exemplo, a Câmara Municipal de Faro, no seu Plano Director Municipal, prevê perímetros de protecção às suas captações para abastecimento público.

Mais recentemente, a Directiva Comunitária nº91/676/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro, relativa à protecção das águas contra a poluição difusa causada por nitratos de origem agrícola, foi transposta para a legislação nacional através do decreto-lei nº235/97, de 3 de Setembro, o qual obrigou à identificação e delimitação de Zonas Vulneráveis, tendo sido identificadas 3 Zonas Vulneráveis em Portugal: o aquífero livre entre Esposende e Vila do Conde, o aquífero quaternário de Aveiro e o aquífero miocénico e jurássico da Campina de Faro. Essa legislação obrigou também à elaboração de um programa de acção para cada Zona Vulnerável.

A portaria nº1037/97, de 1 de Outubro, identificou e delimitou a Zona Vulnerável da Campina de Faro, tendo posteriormente a portaria nº683/98 de 1 de Setembro estabelecido o respectivo programa de acção o qual, no entanto, ainda não foi aprovado na União Europeia.

Actualmente, no âmbito de um estudo encomendado pela União Europeia, coloca-se a hipótese de nos sete principais aquíferos do Algarve serem também delimitadas novas Zonas Vulneráveis, com as implicações daí resultantes sobre as práticas culturais, principalmente na redução das quantidades de fertilizantes azotados a utilizar e eventuais quebras nas produtividades. Esses aquíferos situam-se no barrocal e no litoral, onde houve um forte investimento a nível da citricultura nos últimos anos nos solos situados sobre esses aquíferos, principalmente no aquífero Querença-Silves, o maior e mais vulnerável aquífero do Algarve.

Têm sido estabelecidos, a nível nacional, Programas de Produção Integrada para diversas espécies fruteiras que visam, entre outras preocupações, a protecção ambiental que incluirá, naturalmente, a redução do risco de contaminação das águas subterrâneas, encontrando-se em fase adiantada o processo de aprovação da Produção Integrada dos

Citrinos. A citricultura é actualmente a cultura de regadio que ocupa a maior área, estimando-se em cerca de 18000 ha a área actual ocupada pela cultura.

Actualmente, praticamente a totalidade dos pomares comerciais de citrinos tem rega localizada, predominando a gota-a-gota. Através deste método de rega é possível aumentar a eficiência de aplicação da água e dos nutrientes, sendo possível diminuir as lixiviações dos nutrientes.

1.1 A Zona Vulnerável da Campina de Faro

A Zona Vulnerável da Campina de Faro foi a primeira a ser delimitada no Algarve. Tem cerca de 6000 ha onde se pratica uma agricultura essencialmente de regadio, em que as culturas mais importantes são a horticultura, protegida e de ar livre, e a citricultura. Situa-se nos concelhos de Faro e de Olhão, sendo delimitada pela ribeira de Bela Mandil, caminho de ferro Olhão-Faro, ribeira de Biogal, EN 520-3, estrada Estoi-Areia-Pechão e ribeira de Bela Mandil. Os tipos de solos predominantes, segundo a Carta de Solos elaborada pelo então denominado Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário (SROA), são os Atac, Vt, Vtc, Vc, Pc e Rgc.

Trata-se de uma região de agricultura de regadio, cuja origem da água para rega são as captações subterrâneas dos aquíferos das formações do jurássico e do miocénico. Até Dezembro de 1998 a cidade de Faro tinha como única fonte para o abastecimento público as captações subterrâneas. Actualmente beneficia também das águas superficiais do sistema Beliche-Odeleite.

Abunda também a edificação dispersa, sem saneamento básico, com fossas sépticas mal concebidas, e são inúmeros os casos de pessoas que utilizam as águas das suas captações para consumo. Existem também algumas pequenas lixeiras.

A horticultura, tanto de ar livre como protegida (estufas), expandiu-se nos anos setenta, com excelentes resultados económicos, tornando-se na actividade agrícola mais rentável da região durante toda a década de oitenta, com grande intensificação na utilização de fertilizantes químicos.

Ângelo (1979), num estudo sobre as fertilizações praticadas na horticultura protegida da Campina de Faro, refere "...fertilizações maciças e desequilibradas, indicadoras de um conjunto de técnicas mal dimensionadas...", traduzindo-se por valores de 500 a 1500 kg/ha de N em cerca de 75% das explorações inquiridas e por valores de fósforo assimilável

superiores a 200 ppm, em mais de 50% das explorações, e também superiores a 200 ppm de potássio, em cerca de 70% das explorações. Nalgumas situações observaram-se valores superiores a 1000 ppm, tanto no fósforo como no potássio.

Durante a década de setenta a rega dos pomares realizava-se predominantemente através de caldeiras e a das hortícolas por pequenos sulcos, funcionando como caldeiras. Começaram então a aparecer os primeiros equipamentos de rega localizada, muitos deles de fabrico artesanal (Ângelo, 1979).

Nos últimos anos, gradualmente, diminuíram as áreas de horticultura, tanto a protegida como a de ar livre.

Aumentou a área da citricultura, em que a grande maioria dos pomares é regada por rega localizada, principalmentegota a gota, através de gotejadores de pequenos débitos (2 a 8 L/h), com a fertilização a realizar-se através da água da rega, fertirregação.

1.2 Prováveis novas Zonas Vulneráveis a delimitar no Algarve

Actualmente coloca-se a hipótese de serem delimitadas mais sete novas zonas vulneráveis no Algarve, que abrangerão os aquíferos de: Covões, Querença-Silves, Albufeira-Ribeira de Quarteira, Quarteira, São João da Venda-Quelfes, Luz de Tavira e São Bartolomeu.

Nos últimos anos intensificou-se no Barrocal, a zona calcária entre o litoral e a serra xistosa, a instalação de pomares de citrinos, precedidos por espesregas, nalguns casos em zonas consideradas como de máxima infiltração, nomeadamente sobre o aquífero Querença-Silves, o maior e o mais vulnerável do Algarve, e esta tendência deverá manter-se atendendo à conjuntura económica da agricultura regional (custo da mão de obra, disponibilidade física do empresário agrícola, etc.) e aos diversos tipos de apoio financeiros existentes.

No recentemente instalado Perímetro de Rega do Sotavento, ainda em fase experimental, que beneficia cerca de 8100 ha, prevê-se a conversão do pomar tradicional de sequeiro (alfarrobeira, amendoeira e figueira) para culturas de regadio. Também o futuro Aproveitamento Hidroagrícola do Barlavento que beneficiará uma área de cerca de 20000 ha utilizando águas superficiais e subterrâneas, estando em curso a primeira fase que beneficiará cerca de 5000 ha, contribuirá para uma maior intensificação na actividade agrícola no futuro.

A introdução do regadio e de práticas de fertilização desajustadas poderão colocar também em risco a qualidade destes aquíferos se não forem tomadas as medidas necessárias que passarão pela prevenção, através da sensibilização dos agricultores, da formação adequada para técnicos e agricultores a pela utilização de tecnologias que permitam uma maior eficiência na aplicação da água e dos nutrientes.

1.3 Organização da tese

Face à dimensão do problema actual e às preocupações que se colocam em relação ao futuro da agricultura de regadio no Algarve, entendeu-se que se justificava a elaboração de um trabalho com o objectivo de tentar aprofundar conhecimentos sobre a lixiviação de nitratos com fertirrega e de tentar estabelecer uma metodologia simples para estimar a lixiviação de nitratos numa situação frequente no Algarve: a fertirrega localizada em pomares de citrinos.

Este trabalho divide-se em 8 capítulos em que se começa por apresentar uma breve descrição sobre o azoto no solo, com algum desenvolvimento sobre a lixiviação do azoto sob a forma de nitratos, a que se segue uma resumida descrição do movimento da água no solo. Apresenta-se também uma descrição abreviada da teoria da regagota-a-gota a que se segue uma descrição da aplicação de fertilizantes via água de rega (fertirrega) e uma referência à fertirrega de citrinos. Por fim, descreve-se a metodologia utilizada nos trabalhos de campo e apontam-se as perspectivas futuras.

2. O AZOTO NOS SOLOS AGRÍCOLAS

O azoto é o mais importante nutriente para as plantas, devido às elevadas quantidades requeridas pela maioria das culturas, desempenhando importantes funções a nível da planta. Entra na constituição de um grande número de compostos orgânicos como aminoácidos, proteínas e clorofila, etc. Na grande maioria dos casos, é o principal limitante das produções vegetais (Santos, 1982), pelo que, geralmente, é o nutriente que se aplica em maiores quantidades. É também um nutriente absorvido pelas plantas em “consumo de luxo”; estas absorvem-no em quantidades superiores às que necessitam.

A origem do azoto nos solos agrícolas é muito variada: aplicação de fertilizantes orgânicos e inorgânicos, resíduos das colheitas, excrementos de animais, fixação do azoto atmosférico, precipitações e águas de rega.

As plantas absorvem o azoto sob formas minerais, principalmente sob a forma nítrica (NO_3^-) ou amoniacal (NH_4^+). É também sob estas formas, juntamente com a ureia, que o azoto é usualmente mais aplicado no solo através dos fertilizantes químicos, quase sempre em quantidades elevadas, para uma rápida absorção pelas plantas e para aumentar as produções das culturas. A maioria das plantas parece preferir absorver o azoto nítrico (N-NO_3^-). No entanto, culturas como a batateira ou o arroz apresentam maior tendência para absorver o N-NH_4^+ (Santos, 1982); no caso do arroz essa preferência terá a ver com as reduzidas quantidades de N-NO_3^- disponíveis, devido ao deficiente arejamento do meio que impede a transformação de NH_4^+ em NO_3^- . Muitas árvores de fruto preferem também absorver o azoto na forma amoniacal em detrimento da forma nítrica (Frith e Nichols, 1975, citados por Bacon e Davey, 1982), como parece ser também o caso dos citrinos (Serna *et al.*, 1992).

A absorção do N-NO_3^- pelas plantas requer movimento dos iões de N em direcção à superfície das raízes e ocorre principalmente sob a forma de fluxo convectivo da água do solo para as raízes das plantas, em resposta à transpiração que ocorre na parte aérea da

planta, e por a atracção entre o NO_3^- e os colóides do solo ser negligenciável (Olson e Kurtz, 1982).

O azoto no solo encontra-se principalmente na forma orgânica. Apenas cerca de 2 a 5% se apresenta sob a forma inorgânica (Santos, 1992). A transformação das formas orgânicas para inorgânicas é um processo algo lento e muito complexo, no qual se registam diversas reacções com intervenção dos microrganismos e de enzimas específicas.

As formas inorgânicas do N nos solos são NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ de troca, NH_4^+ não disponível (normalmente fixado no solo), N_2 e o N_2O , existindo outras formas intermédias, químicas ou biológicas, tais como NO , NO_2 , NH_2OH , $\text{HON}\equiv\text{NOH}$ e N_3^- (Young e Aldag, 1982).

Os mais importantes processos das transformações de azoto no solo são a mineralização da matéria orgânica, a imobilização pelos microrganismos, a nitrificação, a desnitrificação, a absorção pelas plantas e a volatilização, ocorrendo também outros como a fixação simbiótica e a lixiviação.

Estes processos são influenciados por diversos factores físicos, químicos e biológicos do solo e pelas alterações na humidade e na temperatura do solo.

Nalguns processos há ganhos de N no solo, como na fixação simbiótica, através das plantas leguminosas, enquanto outros, como a absorção por parte das plantas, a lixiviação e a desnitrificação e a volatilização da amónia, ocorrem perdas.

2.1 Ciclo do azoto

O termo “ciclo do azoto” descreve uma complexa rede de processos em que os compostos azotados são transformados ou retidos no solo, absorvidos pelas culturas ou consumidos pelos animais, perdidos para a atmosfera, sob a forma de gases, ou lixiviados para as águas subterrâneas ou para os cursos de águas superficiais.

Na natureza não existe um ciclo do azoto, na verdadeira acepção do termo. Um determinado átomo de N move-se de um forma para outra de modo completamente irregular e casual (Stevenson, 1982; Carranca, 1996), sendo um processo complexo, no qual o ciclo do azoto no solo é apenas uma parte.

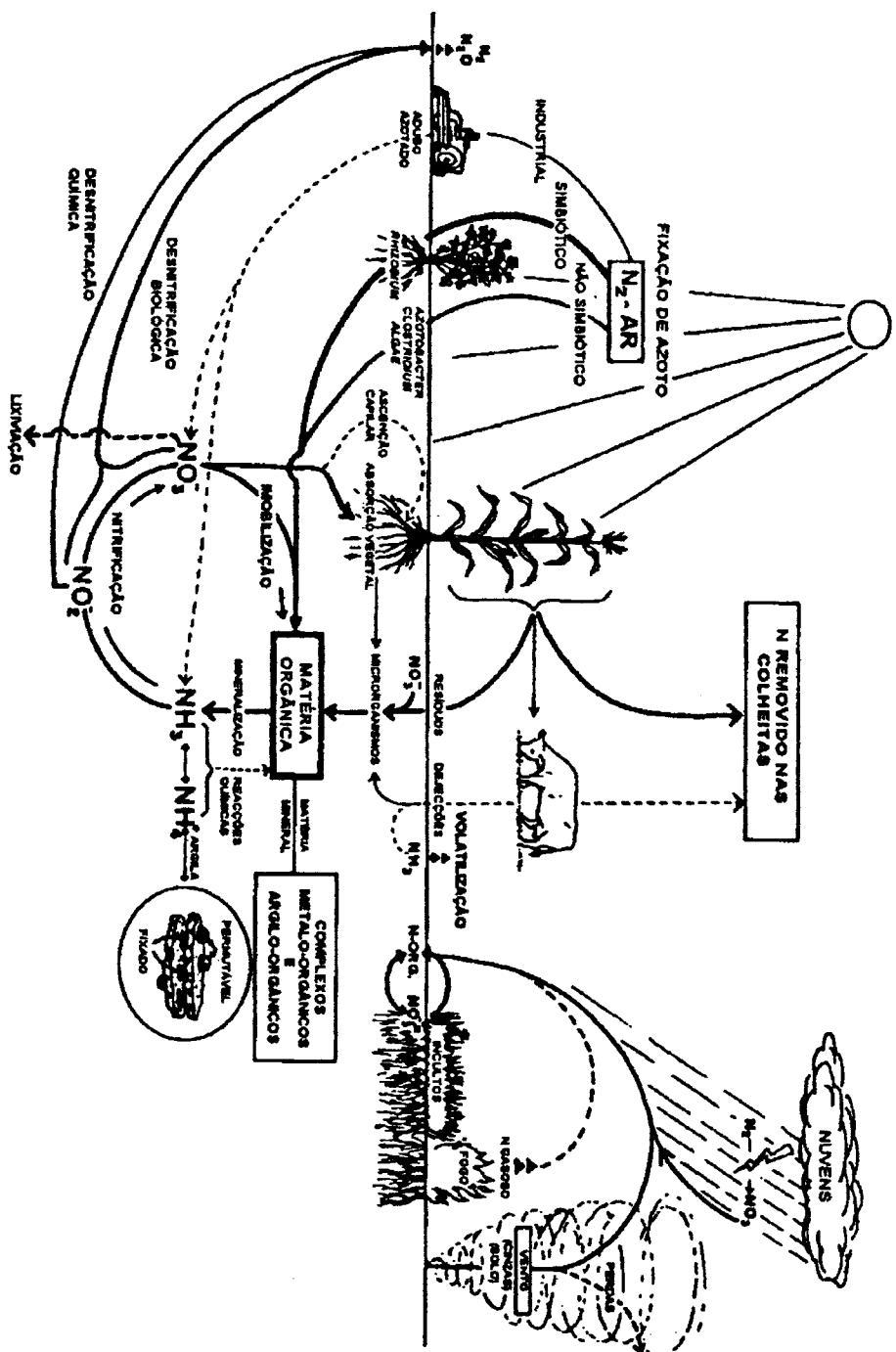


Figura 2.1 Ciclo do azoto

Fonte: Adaptação de Stevenson (1982) por Trindade (1997)

Os ganhos de azoto no solo ocorrem através da fixação molecular, N_2 , através dos microrganismos do solo, e do regresso ao solo do NH_4^+ e do NO_3^- pelas águas da chuva. As perdas dão-se por remoção pelas culturas, pela lixiviação, pela desnitrificação e pela volatilização. A conversão da forma molecular N_2 para formas biológicas, através da fixação biológica do N_2 , é de grande interesse teórico e prático (Stevenson, 1982).

No ciclo do N no solo, ocorre a mineralização que é a transformação das formas orgânicas em formas inorgânicas NH_4^+ e NO_3^- . A conversão inicial para NH_4^+ é designada por amonificação; a oxidação deste composto para NO_3^- é designada por nitrificação. A utilização de NH_4^+ e NO_3^- pelas plantas e pelos microrganismos do solo constituem a assimilação e a imobilização, respectivamente. O N pode ainda regressar à atmosfera sob a forma de N_2 através da desnitrificação ou da volatilização da amónia.

Muitas das transformações do azoto ocorrem simultaneamente no solo; a mineralização ocorre devido às oxidações microbiológicas da matéria orgânica do solo. O azoto mineralizado pode, no entanto, regressar à forma orgânica através da imobilização pelos microrganismos ou perder-se para a atmosfera através da desnitrificação (Terry, 1980).

Todas as transformações de N no solo são mediadas por microorganismos, sendo as mais importantes resultantes de reacções de oxidação e de redução (Stevenson, 1982).

O ciclo do azoto, segundo Campbell (1978) e Jansson (1971), citados por Jansson e Persson (1982), é composto por 3 ciclos interdependentes, tendo uma ou mais partes comuns. Esses ciclos são designados por ciclo elementar, ciclo autotrófico e ciclo heterotrófico. O ciclo elementar inclui a fixação biológica do N_2 e a desnitrificação. O ciclo autotrófico inclui as actividades das plantas verdes que realizam a fotossíntese através da luz solar e sintetizam as substâncias orgânicas primárias. O ciclo heterotrófico é determinado pelas actividade dos microorganismos heterotróficos e é constituído basicamente pela mineralização e pela imobilização.

2.2 Mineralização do azoto

A mineralização do azoto é a decomposição das matérias orgânicas do solo e sua conversão para formas inorgânicas, principalmente NH_4^+ e NO_3^- (Jansson e Persson, 1982; Schepers e Mosier, 1991).

No processo intervém microrganismos que necessitam de uma fonte de energia (como resíduos de culturas ou outros resíduos orgânicos), temperatura favorável e adequadas

condições de humidade. Os complexos orgânicos azotados são muito resistentes à actividade microbiana do solo, pelo que a mineralização só afecta cerca de 2 a 3% do total de azoto do solo (Fernández-Boy *et al.*, 1994).

O balanço entre os teores de C e de N (razão C/N) das fontes de energia é que determina se as formas orgânicas de N serão mineralizadas, podendo ser absorvidas pelas plantas sob as formas disponíveis de NO_3^- e NH_4^+ , ou se o N é imobilizado pelos microrganismos. Existem, no entanto, no solo, vários factores que influenciam a taxa de mineralização do azoto tais como a profundidade, a relação entre a temperatura e a humidade e o teor de humidade.

Cassman e Munns (1980), num estudo realizado num solo franco-limoso, observaram que a taxa de mineralização foi mais elevada na camada superficial (0 a 0,18 m), em que se mineralizou cerca de 42 % do total do azoto mineralizado no perfil, tendo os restantes 58% do azoto mineralizado ocorrido entre os 0,18 e os 1,08 m. Nos primeiros 0,18 m a taxa de mineralização foi o dobro da verificada entre os 0,18 e os 0,36 m. As taxas de mineralização foram mais elevadas com temperatura superiores a 30°C, sendo mais altas quando a tensão de humidade no solo foi de cerca de 0,3 kPa e diminuindo quando a tensão de humidade aumentava.

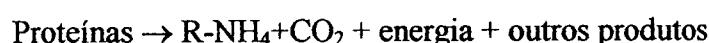
Segundo Terry (1980), as oxidações microbiológicas e a mineralização do azoto são maiores nos solos cultivados que nos não cultivados; o aumento da evolução do CO_2 e da mineralização do N, a partir das culturas do solo, sugerem um aumento da actividade microbiana que poderá resultar da decomposição dos resíduos das plantas e da exsudação das raízes.

Nos solos regados a taxa de mineralização a prever para resíduos recém-incorporados pode ser o dobro da que sucederia na situação de sequeiro (Schepers e Mosier, 1991).

Na mineralização da matéria orgânica há a considerar as seguintes três fases: aminização, amonificação e nitrificação.

2.2.1 Aminização

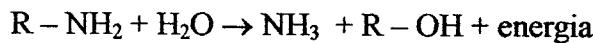
Neste processo intervêm organismos heterotróficos. Segundo Santos (1991), a transformação pode ser representada esquematicamente por:



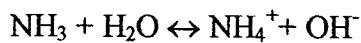
em que $R-NH_4$ representa as aminas e os aminoácidos os quais são compostos que as plantas superiores não são capazes de absorver. A energia resultante da aminização é utilizada pelos microrganismos que intervém nas transformações que se seguem à aminização.

2.2.2 Amonificação

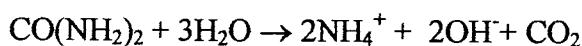
Na amonificação participam também microrganismos heterotróficos - bactérias e fungos - que convertem os compostos orgânicos azotados, como os aminoácidos e as aminas resultantes da aminização, em sais amoniacais através de uma reacção que se poderá representar por:



A energia libertada é também utilizada por organismos heterotróficos, ocorrendo a formação de amoníaco que se poderá protolizar com formação de NH_4^+ , de acordo com a reacção:



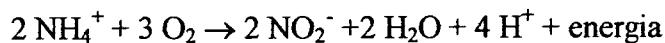
Um dos produtos que se formam nas diversas reacções e transformações químicas que ocorrem durante a amonificação é a ureia. Esta pode ser transformada, através da sua decomposição, em CO_2 e NH_4^+ , através de reacções catalisadas por enzimas, as ureases, presentes no solo, podendo este tipo de reacção representar-se por:



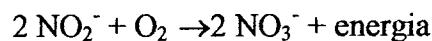
2.2.3 Nitrificação

A nitrificação constitui normalmente a última fase da mineralização e é realizada por organismos autotróficos, genericamente designados por nitrificantes (Santos, 1981). É um

processo estritamente aeróbico, sendo limitado, ou mesmo inibido, em condições de encharcamento (Carranca, 1996). Ocorre em duas fases. Na primeira, através de bactérias do género *nitrosomonas*, o NH_4^+ é convertido em nitrito, NO_2^- , através da reacção:



Na segunda intervêm as bactérias do género *nitrobacter*, convertendo os nitritos em nitratos, de acordo com a reacção:



Os principais factores limitantes da nitrificação são a presença de NH_4^+ no substrato, o teor de O_2 , o teor de CO_2 , o pH e a temperatura (Schmidt, 1982).

Segundo Santos (1982), os solos com teores de humidade óptimos para as culturas favorecem a nitrificação, com arejamento adequado, isto é, com teor de O_2 semelhante ao da atmosfera (cerca de 20%).

A temperatura ideal varia de local para local e em função do tipo de solos. No entanto, a nitrificação parece ser favorecida por temperaturas superiores a 20° C, com máximo até 40°C, segundo estudos realizados por Keeney e Bremmer (1967) nos Estados Unidos, citados por Schmidt (1982). Myers (1975), citado por Shmidt (1982), detectou situações de ocorrência da nitrificação a 60°C, num solo tropical, na Austrália. No nosso clima, a nitrificação ocorrerá principalmente na Primavera e no Verão (Carranca, 1996).

Um pH de cerca de 7 é o mais favorável para as bactérias nitrificantes (Santos, 1976; Engels e Marschner, 1995; citados por Carranca, 1996). O valor de pH 4 é considerado o limite inferior (Shmidt, 1982). Para pH superior a 7 pode haver acumulação temporária de NO_2^- , especialmente quando há aplicação de fertilizantes amoniacais, quando a actividade das *nitrosomonas*, devido há oxidação NO_2^- , pode ser inibida pelo excesso de NH_4OH (Greenland e Hayes, 1981; Franco e Munns, 1982; Rosswall, 1982; Singh, 1982; Schepers e Mosier, 1991; Costa e al., 1993; Vermoesen *et al.*, 1973; citados por Carranca, 1996). Bar-Yosef (1999) refere que o pH óptimo para a nitrificação é de 7,2 a 7,8 e que a pH5 a actividade das bactérias oxidantes é significativamente reduzida.

2.3 Imobilização

A imobilização do N, pelos microrganismos do solo, é a transformação biológica das formas inorgânicas de N (NH_4^+ , NH_3 , NO_3^- , NO_2^-) em formas orgânicas como os tecidos microbianos, daí resultando que o N fica indisponível para a pronta absorção pelas plantas (Schepers e Mosier, 1991; Carranca, 1996). A imobilização, tal como a mineralização, está dependente da razão C/N que determina qual dos dois processos predominará, uma vez que os processos ocorrem simultaneamente no solo, na maioria dos sistemas em que a matéria orgânica é microbiologicamente decomposta.

A maior parte dos solos tem uma razão C/N de aproximadamente de 10:1, enquanto que os corpos dos microrganismos do solo têm valores da ordem dos 5:1 a 10:1. Por contraste, grande parte dos resíduos têm razão C/N maior que 20, pelo que quando os resíduos das culturas sofrem decomposição microbiana, haverá necessidades acrescidas de N, pelos microrganismos, que serão satisfeitas pelos resíduos do solo ou pelos fertilizantes, para suportar o crescimento microbiano (Schepers e Mosier, 1991). Os microrganismos parecem preferir imobilizar o azoto proveniente da mineralização sob a forma de NH_4^+ em relação ao NO_3^- (Jansson e Persson, 1982). Só quando não existe NH_4^+ disponível é que o NO_3^- é utilizado.

A razão C/N à superfície dos solos cultivados é normalmente de cerca de 10-12 nos solos cultivados das regiões temperadas, diminuindo com a profundidade devido à forte diminuição do carbono orgânico (Young e Aldag, 1982).

Segundo Santos (1991), quando a razão C/N é superior a 30 pode-se esperar que ocorra imobilização. Quando a C/N varia entre 20 e 30 e o teor de N é de cerca de 2% haverá um equilíbrio (Campbell, 1978 e Vos, 1974, citados por Carranca, 1996). Se a razão C/N é inferior a 15 como acontece nas siderações (enterramento de materiais verdes como leguminosas) haverá maior disponibilidade de azoto mineral. A imobilização poderá ser significativa quando os resíduos contém menos de 1,2 a 1,5% de N ou têm a razão C/N igual ou superior a 30 (Schepers e Mosier, 1991).

A assimilação do N pelas plantas e a fixação do N_2 são também formas de imobilização, não sendo, no entanto, consideradas como tal (Jansson e Persson, 1982).

2.4 Fixação simbiótica

Uma das formas de o N ficar retido no solo é através de um processo de simbiose entre as plantas, principalmente leguminosas, e microrganismos, em que o N₂ atmosférico é fixado pelas plantas (Meisinger e Randall, 1991).

O mais conhecido processo de fixação simbiótica, e mais importante para a agricultura, é o de algumas plantas leguminosas com bactérias do género *Rhizobium* (Havelka *et al.*, 1982), em que a planta fornece à bactéria sais minerais e substrato orgânico e a bactéria fixa e cede à planta o azoto atmosférico (Santos, 1991).

Em geral, o *Rhizobium* infecta a planta através das raízes e invade os tecidos (Wilkinson, 1975; Burris, 1988; Dreyfuss *et al.*, 1988; Carranca, 1996). Alguns dos tecidos são infectados intracelularmente, daí resultando alargamentos e divisões, com a formação de nódulos (Wilkinson, 1975; Carranca, 1996).

Segundo Santos (1981), na Nova Zelândia, em anos favoráveis, as quantidades de N fixadas no solo podem ser de 500 Kg/ha/ano, nos Estados Unidos cerca de 194 Kg/ha/ano na cultura da luzerna e 58 Kg/ha/ano na cultura da soja.

O azoto resultante deste fenómeno não é aproveitado apenas pelas plantas leguminosas; da decomposição das bactéria e dos nódulos liberta-se N mineral, sob as formas de NH₄⁺ e de NO₃⁻, que poderá ser aproveitado por culturas subsequentes. No entanto, não se deverá criar grandes expectativas sobre as quantidades de N obtidas desta forma, pois entretanto podem ocorrer perdas por lixiviação, ou o N pode ser libertado a profundidades a que os sistemas radicais das culturas subsequentes não possam explorar, pois os sistemas radiculares das leguminosas são muito profundos, bastante mais, por exemplo, que os das gramíneas (Santos, 1991).

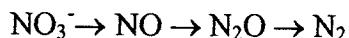
Outras formas de fixação simbiótica podem ocorrer, como é o caso da simbiose entre o actinomiceta *Frankia* e algumas espécies de amieiros e as associações entre as algas azuis e verdes *Anabaena* no interior das cavidades das plantas do género *Azolla* na cultura do arroz na Ásia (Havelka *et al.*, 1982).

2.5 Desnitrificação

A desnitrificação é o principal processo biológico em que o N fixado regressa do solo à atmosfera (Firestone, 1982), através da redução do NO₃⁻ a compostos azotados como o N

molecular, N₂, e vários óxidos de azoto, NO e N₂O, os quais por serem voláteis e pouco solúveis na água se evolam para a atmosfera.

O fenómeno pode-se traduzir-se pela reacção:



em que intervém microrganismos anaeróbios facultativos (capazes de dispensar o oxigénio atmosférico e de utilizar o dos nitratos) que reduzem sucessivamente o N, desde NO₃⁻ até N₂ (Meisinger e Randall, 1991).

Segundo Stevenson (1982), as condições favoráveis para a actividade das bactérias responsáveis pela desnitrificação são:

- Drenagem deficiente, em que o arejamento é também deficiente; a partir de dois terços do valor da capacidade utilizável há condições favoráveis para ela poder ocorrer.
- Temperaturas de 25°C ou superiores; a partir de 20°C diminui progressivamente e praticamente cessa a 2°C.
- Reacção do solo próxima da neutralidade; as bactérias desnitrificantes são sensíveis a elevadas concentrações do ião hidrogénio. Para pH inferior a 5 a sua actividade reduz-se substancialmente.

A desnitrificação ocorrerá mais rapidamente com temperatura do solo superior a 10° C e pH superior a 5 (Firestone, 1982; Legg e Meisinger, 1982; Meisinger e Randall, 1991), principalmente quando o solo volta a ser humedecido, através de precipitação ou por regas, aumentando o teor de água no solo em detrimento do ar o que irá dificultar a difusão do oxigénio que na água é de cerca de 10000 vezes inferior à sua difusão através do ar (Firestone, 1982; Meisinger e Randall, 1991). Patrick e Reddy (1976), citados por Reddy *et al.* (1980), demonstraram que, em solos alagados, este tipo de perdas poderão ser devidas a um processo sequencial no qual há difusão do NH₄⁺ das camadas anaeróbias para as camadas aeróbias, onde haverá oxidação do NH₄⁺, seguindo-se a difusão do NO₃⁻ das camadas aeróbias para as camadas anaeróbias, seguida de reduções do NO₃⁻ para produtos finais gasosos.

Apesar de ser um fenómeno em que há perda de azoto, haverá situações em que poderá ser desejável como no caso de zonas abaixo das raízes em que a redução do NO₃⁻ será benéfica para evitar a lixiviação responsável pela contaminação dos aquíferos (Stevenson,

1982). No entanto, o N_2O é um potente contribuinte para o efeito de estufa; cada molécula de N_2O é cem vezes mais potente que a molécula de CO_2 .

2.6 Volatilização da amónia

Uma grande parte dos fertilizantes azotados aplicados no solo inclui o ião NH_4^+ , sob a forma de sais ou de fertilizantes líquidos como NH_4NO_3 , $(NH_4)_2SO_4$, $(NH_4)_2HPO_4$, etc.

A volatilização da amónia (NH_3) é um processo complexo envolvendo reacções químicas e biológicas, no interior do solo, e transporte físico para fora do solo.

As perdas de amónia dos fertilizantes, por volatilização, são influenciadas pelo método de aplicação, fonte de N, pH do solo, capacidade de troca catiónica do solo e condições atmosféricas (Meisinger e Randall, 1991).

As condições mais favoráveis para a volatilização são as aplicações superficiais, fontes de N contendo ureia, pH do solo superior a 7, baixa capacidade de troca catiónica e condições atmosféricas favorecendo a secura do solo, sendo de prever maiores perdas (2 a 50%) em solos com pH elevado e de 0 a 25% em solos de pH baixo (Meisinger e Randall, 1991).

2.7 Lixiviação do azoto

A lixiviação é, geralmente, a mais importante forma de perda de azoto no solo, por vezes mais importante que as perdas devidas ao consumo das plantas (Legg e Meisinger, 1982). As estimativas das perdas apontadas situam-se geralmente entre os 5 e os 50% das quantidades aplicadas de N (Legg e Meisinger, 1982; Meisinger e Randall, 1991). As perdas de N por lixiviação dão-se sobretudo na forma de NO_3^- embora também possam ocorrer sob a forma de NH_4^+ .

A lixiviação ocorre quando se reúnem duas situações: altos teores de NO_3^- presentes no solo e intenso movimento de água no solo (Watts e Martin, 1981; Legg e Meisinger, 1982; Martin *et al.*, 1991; Meisinger e Randall, 1991; Peterson e Power, 1991; Smith e Cassel, 1991; Syvertsen e Smith, 1996; Alva e Paramasivam, 1998). A principal contribuição para os altos teores de N no solo serão as fertilizações das culturas agrícolas, através da aplicação de fertilizantes químicos ou da incorporação de matéria orgânica. A intensidade do movimento

da água no solo dependerá das precipitações, das dotações das regas e das características dos solos (textura e teor em matéria orgânica), nomeadamente a capacidade de retenção e a permeabilidade.

Na lixiviação dos nitratos, resultante da actividade agrícola, há quatro importantes factores que dependem do controle do agricultor: dotações de rega, fonte do azoto, quantidades de azoto aplicadas e gestão da aplicação do azoto (Watts e Martin, 1981). A lixiviação dos nitratos, está em suma, associada à eficiência da utilização do azoto e da água pelo que a deficiente gestão da utilização de fertilizantes azotados e das águas a potencia (Knox e Moody, 1991).

O clima e o tipo de solo têm também forte influência; as precipitações elevadas contribuem para uma maior lixiviação, assim como os solos de texturas mais ligeiras. No solo, as mobilizações e a sua influência na macroporosidade do solo têm também significativa influência na intensidade da lixiviação, devido à criação de condições para se processarem escoamento preferenciais.

A lixiviação do azoto não ocorre apenas na forma de NO_3^- , podendo ocorrer também sob a forma de NH_4^+ , principalmente em solos com baixa capacidade de troca catiónica, como os solos arenosos.

Neste trabalho desenvolveu-se apenas o estudo da lixiviação do N-NO_3^- .

2.7.1. Expressão da convecção-difusão

Sendo basicamente um processo de movimento de solutos, a lixiviação de nitratos caracteriza-se por dois mecanismos independentes, mas que se produzem em simultâneo: as transferências por convecção, que correspondem ao transporte de solutos por deslocação da fase líquida, e as transferências por difusão molecular, que correspondem à homogeneização progressiva da solução (Santos, 1997).

Tratando-se de um fenómeno de transferência de um soluto não reactivo, a lixiviação dos nitratos no solo é usualmente representada pela expressão da convecção-difusão que pretende representar simultaneamente os processos de difusão, convecção e de algumas reacções irreversíveis de produção e de adsorção de azoto no solo. Para escoamentos unidimensionais, considerando-se também a variação do teor de humidade, a expressão poderá ter a forma:

$$\frac{\delta(\theta C)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left[D \theta \frac{\delta C}{\delta x} \right] - \frac{\delta(qC)}{\delta x} \quad (2.1)$$

em que θ é o teor de humidade do solo (L^3/L^3), C é a concentração do soluto (M/L^3), t é o tempo (T), D é o coeficiente de difusão-dispersão do soluto (M^2/T), x é a componente vertical da variável espacial e q é o fluxo darciano da água no solo (L/T)

Se não se considerar a variação do teor de humidade, a expressão poderá também tomar a forma:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left[D \frac{\delta C}{\delta x} \right] - \frac{q}{\theta} \frac{\delta C}{\delta x} \quad (2.2)$$

onde o termo q/θ representa a velocidade nos poros, v , assumindo que θ é o teor de humidade médio no perfil.

Pode também assumir a forma:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - v \frac{\delta C}{\delta x} \quad (2.3)$$

No lado direito da equação, o primeiro termo representa o processo de dispersão-difusão e o segundo a convecção. O coeficiente de difusão-dispersão D do soluto depende da velocidade da água nos poros, v , a qual é dada por q/θ . O valor de D pode-se determinar (Smedt e Wierenga, 1978 ; Vogeler *et al.*, 1996), por:

$$D = \lambda v + \tau D_m \quad (2.4)$$

em que λ é uma constante de proporcionalidade designada por dispersividade (L), τ é a tortuosidade e D_m é a difusividade molecular do ião (L^2/T). Os valores de τ variam entre 0,3, para solos argilosos, e 0,7, para solos arenosos (Elrick e Clothier, 1990).

Também Biggar e Nielsen (1976), citados por Amoozegar-Fard *et al.* (1982), estabeleceram a relação:

$$D = 0,6 + 2,93v^{1,1} \quad (2.5)$$

Em resumo, o coeficiente de difusão-dispersão do soluto é função da velocidade do fluxo convectivo, o qual diminui com a diminuição da velocidade, aproximando-se da difusão molecular quando o fluxo cessa (Murali e Aylmore, 1981).

Para determinação das quantidades de água e de solutos que continuam a mover-se mesmo depois de ter cessado a infiltração, num processo de lixiviação durante a redistribuição, é importante estimar-se o valor de D (Amoozegar-Fard *et al.*, 1982).

Amoozegar-Fard *et al.* (1982) concluíram que a influência da variabilidade de D no processo de lixiviação diminuía com a profundidade, quando comparada com a variação de v . Pode-se também estabelecer uma relação entre v e D através da expressão (Nielsen *et al.*, 1986):

$$D = \gamma|v|^n \quad (2.6)$$

em que γ e n são parâmetros de ajustamento e a contribuição da difusão para D é ignorada.

2.7.2 Influência da utilização dos fertilizantes azotados

Em virtude de nos solos cultivados o balanço dos ganhos e perdas tender para ser negativo, há quase sempre a necessidade de se recorrer a fertilizantes azotados (Santos, 1991), para se conseguirem os rendimentos desejados.

A forma como são utilizados os fertilizantes químicos que contém N é de extrema importância na intensidade da lixiviação de nitratos. Para além das quantidades a utilizar, a época em que são aplicados, o seu fraccionamento, a forma em que o N se encontra no fertilizante são também aspectos muito influentes no processo. No entanto, as maiores perdas por lixiviação parecem estar sempre associadas às maiores quantidades aplicadas (Kanwar *et al.*, 1984).

Assim, as quantidades de N a aplicar não deverão exceder as exportações da cultura em causa e deverão ser fraccionadas de acordo com as exigências ao longo do seu ciclo cultural.

O cálculo das quantidades a aplicar poderá ser realizado através duma expressão semelhante à proposta no Código das Boas Práticas Agrícolas (1997):

$$F = N - (S + A + B + R) + (I + P + L) \quad (2.7)$$

em que:

F – azoto a fornecer pela fertilização

N – necessidades da cultura em azoto para um determinado nível de produção

S – azoto disponibilizado pelo solo durante o ciclo vegetativo da cultura

A – azoto fornecido pela água de rega e através de deposições atmosféricas secas (poeiras) ou húmidas (chuvas)

B - azoto fixado biologicamente sobretudo através da simbiose Rizóbio-Leguminosa

R – azoto proveniente dos resíduos das culturas precedentes

I – azoto imobilizado pelos microrganismos do solo

P – perdas de azoto por volatilização, inclusive por desnitrificação

L – perdas de azoto por lavagem nas águas de escoamento e de percolação

Durante os meses de Inverno, no nosso clima, de dormência das plantas e, em princípio, mais chuvosos, não deverão ser aplicados fertilizantes, devido ao maior risco de lixiviação dos nitratos. As maiores quantidades deverão ser aplicadas nas épocas de maiores exigências pelas culturas, que são a floração e o vingamento dos frutos. Será preferível também que sejam repartidas para aumentar a eficiência de utilização, pela diminuição das perdas. Mais adiante, no capítulo dedicado à fertirregação localizada, esta questão será abordada com maior detalhe.

Também a forma em que se encontra o N no fertilizante e a época e o modo como é aplicado têm influência na eficiência da utilização do azoto. Assim, nas fertilizações tradicionais, os adubos amoniacais deverão ser utilizados essencialmente nas fertilizações de fundo, enquanto que os adubos nítricos deverão ser utilizados em adubações de cobertura.

Actualmente, existem também os designados adubos de libertação lenta, produzidos para aumentar a eficiência de utilização do azoto, principalmente nas culturas perenes. Os adubos de libertação lenta podem ser de baixa solubilidade ou terem a forma de grânulos revestidos por membranas praticamente impermeáveis, só se degradando pela ação de microrganismos.

As formas de N mais solúveis são o NO_3^- e a ureia, pelo que são também as mais facilmente lixiviáveis, embora o NH_4^+ em solos de baixa capacidade de troca catiónica, como os de textura arenosa, também o possam ser. A ureia pode ser lixiviada antes de se hidrolizar para a forma de NH_4^+ . O atraso na hidrólise da ureia, pelas ureases, pode ser devido a condições adversas como o pH ser inferior a 5 o que diminui substancialmente a actividade das ureases (Fenn e Hossner 1985, citados por Wang e Alva, 1996).

Com o objectivo de retirarem conclusões para a fertilização de citrinos na Florida, Wang e Alva (1996) realizaram um trabalho no qual compararam os resultados obtidos a partir da aplicação, em colunas de dois tipos de solos arenosos, em estufa, de 3 tipos de fertilizantes azotados: nitrato de amónio e dois fertilizantes de liberação lenta isobutidileno-diureia e ureia formaldeído. Foram simulados também 8 eventos de precipitação, equivalentes a uma precipitação de 12,7 mm ocorrida em cerca de 6 horas, com 4 dias de intervalo. Observaram que cerca de 30% do azoto aplicado sob a forma de adubos de liberação lenta foi lixiviado, nas diferentes formas, ureia, NH_4^+ e NO_3^- (Wang e Alva, 1996), mas cerca de 88% do total de azoto lixiviado foi sob a forma rapidamente solúvel de nitrato de amónio. Nos adubos de liberação lenta a lixiviação deu-se sobretudo sob a forma de ureia, e durante os primeiros eventos de precipitação após a aplicação no solo, talvez devido a que as ureases que intervém na hidrólise da ureia pudessem ter estado inactivas nessa altura, principalmente no solo de pH mais baixo. As formas de NH_4^+ e NO_3^- começaram também a ser lixiviadas logo nos primeiros eventos de precipitação.

De alguma importância se reveste também o local onde são colocados os fertilizantes (se forem aplicados à superfície) ou a posição dos tubos de rega no caso da fertirregação localizada, devido à intercepção da chuva pela copa das árvores, registando-se significativas diferenças de precipitação entre os pontos debaixo das copas e os que estão fora (Alva *et al.*, 1997), que se traduzem por teores de humidade do solo e movimento da água no solo mais elevados nas zonas completamente expostas à precipitação que nas debaixo das copas, sendo as diferenças maiores para profundidades no perfil do solo superiores a 0,60 m, ou seja, abaixo da maior concentração de raízes. Tal aconselha a que os fertilizantes sejam colocados debaixo das copas para diminuir a lixiviação.

2.7.3 Influência da rega e da drenagem

A rega e a drenagem são os principais meios de gerir a água no solo (Martin *et al.*, 1991).

No nosso clima mediterrâneo os elevados valores da evapotranspiração nos meses de primavera, verão e início do outono, obrigam a um regadio intensivo que poderá ser responsável por lixiviação, se mal conduzido.

A rega aumenta o teor de água no solo e reduz o stresse hídrico das culturas, mas poderá também implicar aumentos nas quantidades percoladas. Nalgumas situações, quando se utilizam águas com elevados teores de sais, é aconselhável proceder-se à lavagem dos sais do solo, através do aumento da dotação de rega, o que poderá provocar também maior lixiviação de nitratos.

A rega ao ser bem conduzida, para além do correcto suprimento das necessidades hídricas das plantas, apresenta duas vantagens adicionais: menores perdas de N por lixiviação, quando se evita que a água humedeça camadas de solo abaixo da zona de expansão radical, e menores perdas por desnitrificação, ao evitar-se que o solo tenha teores de humidade acima da capacidade de campo durante muito tempo.

O controlo da drenagem pode também diminuir as quantidades de N-NO_3^- lixiviadas.

2.7.3.1 Influência do método de rega na lixiviação de nitratos

Para além de ser indispensável que a rega se realize de modo a que a frente de humedecimento não ultrapasse a zona de enraizamento para evitar perdas de água e nutrientes, há a referir que o processo de lixiviação depende também do método de aplicação de água.

Jaynes e Rice (1993) após experiências realizadas em que compararam a rega por alagamento com a regagota-a-gota, concluíram que na rega por alagamento os valores da dispersão e da “dispersividade” são superiores aos encontrados para a regagota-a-gota, podendo ter um maior efeito na contaminação das águas subterrâneas, e o facto de a velocidade aumentar em profundidade poderá ser um indício de uma aceleração no transporte dos solutos. Na rega por inundação, em que a água é aplicada com uma carga positiva, resulta uma grande variabilidade do soluto, aumentando a dispersão e a difusão quando comparadas com a regagota-a-gota. Na regagota-a-gota quando se forma o charco à

superfície do solo a taxa de infiltração é comandada pelas características de infiltração e não pela taxa de aplicação (débito dos gotejadores). Nas regas diárias por inundaçāo as velocidades relativas tendem a aumentar com a profundidade indicando aceleração no transporte dos solutos.

Santos (1994) observou que, numa situação de fertirrega com canteiros de nível, o movimento dos nitratos está fortemente dependente do movimento da água e é a convecção que comanda o transporte dos solutos, tendo o processo de dispersão sido muito menos importante no caso estudado.

Kengni *et al.* (1994) indica que o termo da dispersão, na equação da convecção-dispersão, representa apenas 6% do termo da convecção.

2.7.3.2 Influência da drenagem

Geralmente, nos solos com má drenagem subterrânea as quantidades de nitratos lixiviados são menores que nos solos bem drenados devido à desnitrificação (Skaggs e Gilliam, 1991).

Poderá haver interesse no controlo da toalha freática, em função das características da cultura, através da manutenção da toalha freática pouco abaixo das raízes, mas mantendo as condições favoráveis para o bom desenvolvimento da cultura.

Lalonde *et al.* (1996) realizaram um trabalho experimental no qual mantiveram, nalguns pontos do solo, a toalha freática acima do sistema de drenagem existente, situado a um metro de profundidade. Controlaram a toalha freática a 0,25 e a 0,50 m acima do sistema de drenagem, tendo verificado que as quantidades lixiviadas de nitratos foram menores quando mantiveram a toalha freática 0,50 m acima do sistema de drenagem, e que da manutenção da toalha a 0,25 m acima do sistema de drenagem resultaram também menores quantidades lixiviadas que no sistema de drenagem instalado.

2.7.4 Factores climáticos

O tipo de clima tem forte influência no processo de lixiviação. No nosso tipo de clima mediterrâneo, durante o outono e o inverno uma grande parte de espécies de plantas estão menos activas, necessitando de menores quantidades de nutrientes. Também nesta altura a

evapotranspiração cultural é mais baixa e a precipitação mais elevada, pelo que aumenta a probabilidade de ocorrência de um intenso movimento de água abaixo da zona de maior concentração das raízes e a consequente lixiviação de nitratos, principalmente se na altura houver uma grande quantidade de nitratos no solo, pelo que a precipitação que ocorre no período de Outubro a Março tem forte influencia na distribuição e acumulação do N no solo.

No âmbito dos planos de acção para as “Zonas Vulneráveis” e na regulamentação para a “Produção Integrada”, é preconizada a obrigatoriedade da manutenção do coberto vegetal espontâneo entre as linhas das culturas arbóreas para diminuição do movimento da água proveniente das chuvas e poder existir algum consumo do azoto existente no solo.

2.7.5 Influência das propriedades do solo

A permeabilidade do solo, a capacidade de armazenamento da água no solo, a textura e a espessura do solo influenciam fortemente a quantidade de água percolada através do solo e o tempo de reacção dos processos biológicos e químicos que alteram o N no solo, sendo a própria matéria orgânica também uma fonte de azoto. A proximidade da toalha freática tem também uma grande influência na rapidez do processo de contaminação dos aquíferos (Knox e Moody, 1991), sendo o processo mais rápido quando a toalha freática se encontra mais próxima da superfície do solo.

A determinação da quantidade da água percolada através e para baixo da zona radical das culturas é importante para calcular as quantidades de NO_3^- lixiviadas (Williams e Kissel, 1991), pois a lixiviação do azoto a partir da zona radical depende da drenagem da água para fora desta zona. Assim, solos com baixa permeabilidade restringem este tipo de movimento, promovendo o movimento horizontal dos solutos (Menezes *et al.*, 1997), enquanto que os solos com elevada permeabilidade conduzem rapidamente os nitratos para baixo da zona radical (Knox e Moody, 1991).

A capacidade de retenção de água pelos solos também influencia as quantidades de N lixiviado. Os solos com maior capacidade de retenção terão menos perdas de azoto por lixiviação. Legg e Meisinger (1982) citam um trabalho de Kolenbrander (1972) em que foram sistematicamente estudadas as perdas por lixiviação, através de lisímetros em solos de texturas diferentes, tendo sido observado que as maiores perdas, a partir da matéria orgânica do solo, aconteceram em solos arenosos, com perdas de N ordem dos 45 Kg/ha/ano, sendo as



perdas de N nos solos argilosos de textura pesada da ordem dos 5 Kg/ha/ano, tendo a diferença sido atribuída a perdas por desnitrificação.

Geralmente os solos mais susceptíveis à lixiviação são também os mais regados (Smith e Cassel, 1991), como os solos arenosos, com fraco poder de retenção para a água, por serem muito permeáveis, o que implica que se tenha que recorrer ao regadio para se alcançarem as produtividades desejadas.

William e Kissel (1991), descrevem um estudo no qual compararam dois tipo de solos de texturas diferentes – franco-arenosa e argilosa – com cultura, trigo, e sem cultura sujeitos a uma precipitação simulada de cerca de 75 mm durante um dia. No solo de textura franco-arenosa, na situação de solo nu ocorreu uma percolação de 28 mm nos dois primeiros dias e com a cultura de trigo a percolação foi de 23 mm no mesmo período. No solo argiloso, na situação de solo nu a percolação foi mais lenta, atingindo um total de 19 mm, enquanto que com cultura foi de 6 mm. Verificaram também que no solo argiloso a cultura absorvia a água retida acima da capacidade de campo logo após o primeiro dia a seguir à precipitação.

Outro aspecto a considerar é o da pedregosidade dos solos. No barrocal do Algarve abundam os solos de formações, alguns associados a afloramentos rochosos (principalmente os solos da família Vcd e com e sem afloramentos rochosos), nas zonas de calcários cársicos, que favorecem o escoamento preferencial junto às suas numerosas pedras ao qual se seguirá depois o movimento através das fissuras da rocha subjacente ao perfil do solo.

As características químicas dos solos têm também influência no processo. Assim, a profundidade atingida pelas raízes e respectiva densidade podem ser condicionadas pela acidez do solo e pelo excesso de alumínio solúvel que poderão ser, nalguns tipos de solos, a justificação para a incapacidade para absorção dos nutrientes, nas camadas mais profundas, de algumas culturas (Menezes et al., 1997).

2.7.6 Influência dos macroporos através do escoamento preferencial

Os macroporos são fendas no solo, causadas por canais abertos pela pequena fauna do solo, por raízes ou pela própria estrutura do solo e têm sido identificados como um importante meio de escoamento preferencial (Beven e German, 1982, citados por Li e Ghodrati, 1994). A água move-se livremente através dos macroporos, pelo que um solo com uma grande quantidade de macroporos pode conduzir mais água quando está saturado do que um solo com poucos macroporos. Num solo saturado com um número elevado de

macroporos, o humedecimento da zona radical será menos uniforme e a probabilidade de se perder água e solutos por lixiviação será maior.

Segundo Biggar e Nielsen (1967), citados por Gish e Jury (1983), em solos uniformes o transporte de solutos pode ser adequadamente descrito pelo modelo “convecção-difusão”. No entanto, apesar de algumas experiências, realizadas em colunas de solo homogéneo, poderem validar a equação da convecção-dispersão para descrever o movimento da água e dos solutos, existem situações que não são consideradas pela equação, como é o caso da distribuição dos macroporos em que há uma grande distribuição das velocidades da água (Rose, 1973; Davidson *et al.* 1983, citados por Santos, 1994), pelo que se os solos são estruturados ou têm canais de fluxo dever-se-á utilizar uma representação teórica que inclua o efeito do “bypass” dos poros ou a água imobilizada, a água adjacente aos grãos de solo ou retida nos poros (Gish e Jury 1983). Beven e German (1982), citados por Santos (1984), mostraram que a infiltração e a redistribuição da água nos solos que possuem macroporos não são adequadamente descritas pelas teorias que consideram o solo homogéneo, segundo os princípios de Darcy, tendo concluído que o volume e a estrutura do sistema dos macroporos representam um balanço dinâmico entre os processos construtivos e destrutivos (Singh *et al.*, 1991).

O escoamento preferencial de água e de nitratos através dos macroporos é assim a principal razão para a grande variabilidade das concentrações de NO_3^- no solo, sendo, na saturação ou em condições próximas da saturação, um importante mecanismo na potencial rapidez da lixiviação do NO_3^- e de outros sais solúveis (Smith e Cassel, 1991). Segundo Flury *et al.* (1996), citados por Wallach e Steenhuis (1998), experiências recentes sugerem que o escoamento preferencial será muito mais a regra que a exceção nas situações de campo. A mobilidade dos produtos químicos e de contaminantes no solo é afectada pela continuidade e pela dimensão dos poros (Steenhuis, 1995, citado por Wallach e Steenhuis, 1998).

Gish e Jury (1983) após um estudo em que compararam a dispersão num solo nu seguido de cultura de trigo com um solo nu após trigo concluíram que as raízes das plantas rearranjaram as partículas, diminuindo o tamanho dos poros (e uniformizando-os), diminuindo os valores do coeficiente de dispersão e criando um leque reduzido de velocidades nos poros. Após a morte das raízes, os macroporos formados por estas poderão ser o factor mais importante para o transporte de solutos com elevados fluxos, aumentando a dispersão e diminuindo o “tempo de percurso” do fluxo para os aquíferos. Haverá maior dispersão após a cultura, através dos canais das raízes mortas.

As experiências de Ellsworth (1991, citadas por Li e Ghodrati, (1994) demonstraram a importância dos canais originados pelas raízes no transporte dos solutos. Também os trabalhos de Li e Ghodrati (1994), sobre os canais abertos por raízes de milho e de luzerna, demonstraram a importância dos canais radiculares em decaimento como exemplo de escoamento preferencial em macroporos.

2.7.6.1 Influência do tipo de mobilização na formação de macroporos

O tipo de mobilização pode ter influência no desenvolvimento de macroporos, na sua distribuição, persistência e continuidade, sendo por isso necessário determinar a macroporosidade para melhor se compreender o transporte de solutos em diferentes tipos de mobilização (Singh *et al.*, 1991).

A realização ou não das mobilizações convencionais tem influência no número e distribuição dos macroporos, surgindo, no entanto, contradições na bibliografia, sobre qual tipo de mobilização originará maior macroporosidade e consequentemente maior lixiviação.

Kanwar *et al.* (1985), num estudo com talhões mobilizados e não mobilizados, concluíram que nos talhões não mobilizados havia maior retenção de NO_3^- nos primeiros 0,15 m do solo que nos talhões mobilizados, após intensas precipitações, o mesmo sucedendo em maiores profundidades (0 a 1,5 m). Concluíram também que havia maior lixiviação nos talhões mobilizados que nos talhões não mobilizados. Os mesmos autores citam um trabalho de Tyler e Thomas (1977) no qual se observaram maiores quantidades de NO_3^- lixiviado em situação de não mobilização que nas situações de mobilização convencional. Bennett e Stanford (1970), também citados por Kanwar *et al.* (1985), encontraram maiores teores de NO_3^- num solo após a colheita de milho, em que não houve mobilizações, que num solo mobilizado, sendo a diferença maior nos primeiros 0,60 m de profundidade.

Embora sem confirmação estatística, Singh *et al.* (1991), num seu estudo, referem ter encontrado maior número de macroporos até 0,20 m de profundidade nos solos não mobilizados que nos solos mobilizados, mas que essa tendência se invertia nas camadas inferiores. No entanto, os mesmos autores referem outro trabalho, também realizado em 1991, no qual mostraram que um significativo maior número de macroporos se formava num sistema de não mobilização que num sistema de mobilização convencional, demonstrando também que em ambos os casos os macroporos aumentavam com o aumento da

profundidade. Citam ainda um trabalho de Singh e Kanwar (1991) no qual mostravam que nos solos não mobilizados o fluxo preferencial era maior.

2.7.7 Influência do tipo de coberto vegetal

O movimento dos nitratos no solo depende também do tipo de coberto vegetal. No caso das culturas anuais, se após uma campanha os solos estiverem sem coberto vegetal, nos meses de outono e inverno em que chove mais haverá maiores perdas de nitratos, devidas a um menor consumo e por a evaporação ser bastante baixa, o que aumenta o fluxo de água no sentido descendente, e haverá mais lixiviação provocada pela drenagem da água proveniente da precipitação, situação descrita por Guillard *et al.* (1995) para o Connecticut (Estados Unidos da América), por Kegni *et al.* (1994) para França e por Moreno *et al.* (1996) para Espanha. Nas situações de alqueive não revestido haverá maiores perdas de azoto que nos solos revestidos, principalmente se a precipitação for elevada.

A manutenção do coberto vegetal espontâneo tem interesse para reduzir a lixiviação no período outono-inverno, devido à intersecção, e a algum consumo, das águas pluviais, diminuindo a intensidade do movimento da água, e também para que alguma parte dos nutrientes possa ser consumida, embora esse consumo seja bastante inferior ao das culturas (Shipley *et al.*, 1992, citados por Guillard *et al.*, 1995). A utilização de herbicidas no inverno é contrapudcente pois promoverá a decomposição da biomassa fina das raízes e haverá falta de vegetação para consumir o NO_3^- presente no solo (Gay *et al.*, 1996).

O conceito de lixiviação está também associado ao tipo de cultura instalado e também às anteriores e às posteriores. Assim, o tipo de cultura tem influência sobre o grau de lixiviação que se pode esperar. As culturas com sistema radical mais aprofundante, como as plantas leguminosas, e particularmente a luzerna, têm maior capacidade para absorver a água e os nutrientes a maiores profundidades, enquanto que nas culturas hortícolas com sistemas radicais menos profundos não têm essa capacidade, de onde resultará lixiviação a profundidades menores. Num estudo do processo de lixiviação, para além de as culturas actualmente no solo, não deverá ser ignorado o tipo de cultura que se lhe seguirá nos anos seguintes, nem a anterior. Assim, se a uma cultura com sistema radical profundo, como uma leguminosa, se seguir uma de menor capacidade radical, esta não poderá assimilar o azoto proveniente da mineralização dos nódulos mais profundos, ocorrendo lixiviação.

No caso das culturas arbóreas de folha persistente, como os citrinos, as copas podem interceptar quantidades significativas das águas da precipitação, reduzindo o movimento de da água e a lixiviação nas superfícies sob as copas (Alva *et al.*, 1997).

2.7.8 Metodologias utilizadas para a monitorização da lixiviação de nitratos

No nosso clima mediterrâneo têm-se realizado alguns trabalhos de monitorização da lixiviação de nitratos, embora com culturas arvenses e hortícolas.

Kengni *et al.* (1994) referem um trabalho realizado em França numa cultura de milho, regado por aspersão, na qual monitoraram os primeiros 0,80 m da camada de solo, correspondente à zona de maior concentração das raízes da cultura. A monitorização consistiu na medição dos teores de humidade volúmica, com sondas de neutrões, na determinação da tensão de humidade do solo, por tensiómetros, e na recolha da solução do solo, através de cápsulas de sucção para posterior determinação das concentrações dos nitratos. Os trabalhos decorreram durante 3 anos.

Realizaram balanços hídricos, através da equação da conservação da massa:

$$\Delta S = R + I - D - AET \quad (2.8)$$

em que ΔS é a variação da água armazenada (mm) no perfil do solo explorado pelas raízes, R é a precipitação (mm), I a dotação de rega (m), D é a drenagem (m), na profundidade z correspondente à zona radical, e AET é a evapotranspiração cultural actual (mm).

Como termos desconhecidos consideraram a drenagem e a evapotranspiração, pelo que determinaram a condutividade hidráulica através da lei de Darcy:

$$D = q\Delta t = -K(\theta) \text{grad} H \Delta t \quad (2.9)$$

em que q é o fluxo médio (mm/dia) durante Δt , $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica (mm/dia) correspondente ao teor de humidade à profundidade z e $\text{grad } H$ é o gradiente da carga hidráulica a essa mesma profundidade. Na equação (2.2) θ e $\text{grad } H$ são valores médios no intervalo Δt , pelo que é necessário que as variações no teor de humidade, à profundidade z , sejam muito pequenas, com um máximo de $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ durante o período Δt . Isto é

devido à sensível dependência de K em relação a θ na relação $K(\theta)$. Esta metodologia requer que esta relação seja conhecida à profundidade z em qualquer ponto do solo, pelo que para determinar as relações $K(\theta)$ os autores utilizaram o método do fluxo nulo, cuja descrição se pode encontrar em Santos (1997). Para a situação de verão, com regas, realizaram-se balanços hídrico diários, com base nas leituras diárias dos tensiómetros e realizando interpolações com os valores dos teores de humidade medidos semanalmente através das relações entre o teor de humidade e a tensão de humidade, entretanto estabelecidas.

Para as situações de outono e inverno, determinaram a AET através do método de Penman-Monteith, sendo a drenagem determinada através da expressão (2.8).

No trabalho estudaram também a quantidade de $N-NO_3^-$ resultante da mineralização da matéria orgânica através da monitorização de solo nu, por determinação da quantidade de $N-NO_3^-$ existente no perfil do solo através da expressão (2.10):

$$N = \frac{[NO_3^-]\theta_{\Delta z}\Delta z}{4.42} \quad (2.10)$$

em que $[NO_3^-]$ é a concentração de nitratos na solução do solo, $\theta_{\Delta z}$ é o teor médio de humidade na camada de solo considerada e N é a quantidade de azoto expressa em massa por unidade de área.

Para determinar a quantidade de $N-NO_3^-$ lixiviada, L_N , abaixo da profundidade considerada, z , desprezaram a contribuição da dispersão para o fenómeno da lixiviação, considerando-se apenas a convecção, assumindo que o termo da dispersão, na equação de transporte da convecção-dispersão, representa, no máximo, 6% do valor do termo da convecção, sendo, assim, a quantidade de $N-NO_3^-$ lixiviada, L_N calculada através da expressão (2.11):

$$L_N = DC_z \quad (2.11)$$

em que D é a drenagem à profundidade z e C_z a concentração dos nitratos a essa mesma profundidade.

Concluíram que a fertilização usualmente praticada na região pelos agricultores, de cerca de 260 Kg de N/ha, poderia ser reduzida em cerca de 100 Kg de N/ha sem quebra de produção.

Moreno *et al.* (1996) realizaram um estudo bastante semelhante em Espanha, na região de Sevilha, a nível dos equipamentos, da metodologia utilizada e também numa cultura de milho, regado por sulcos, sendo a condutividade hidráulica determinada através do método do fluxo nulo. Os trabalhos decorreram durante 3 anos, em que compararam um nível de fertilização azotada utilizado pelos agricultores da região com um nível de fertilização correspondente a um terço desse valor. Observaram que a maior lixiviação de N-NO_3^- ocorreu quando o solo estava nu, entre duas campanhas. No nível de fertilização mais baixo a lixiviação foi muito menor, mas sem prejuízo da produção alcançada.

Bruckler *et al.* (1997) referem também uma metodologia semelhante para a monitorização da lixiviação de nitratos com alfaces, com a evapotranspiração a ser calculada pelo método de Penman e a drenagem a ser determinada também através da expressão (2.1), num trabalho orientado para a variabilidade espacial e temporal dos nitratos no solo.

Fares e Alva (2000) referem que a determinação das perdas de água por percolação profunda (drenagem) poderá ser realizada através da monitorização da variação do teor de humidade abaixo da zona radical, tendo para o efeito testado a utilização de sondas capacitivas (cujo funcionamento se descreve no capítulo 3), considerando que o aumento do teor de humidade numa camada de solo abaixo da zona radical, após um evento de rega ou de precipitação, resulta das perdas ocorridas na zona radical.

Uma metodologia alternativa para estimar as quantidades de nitratos lixiviadas é proposta por Al Jamal (1994) no contexto de um seu trabalho experimental em que apresenta a metodologia descrita por Prat *et al.* (1978) para calcular a lixiviação dos nitratos através da determinação da concentração do ião Cl^- , nas águas de rega e de drenagem, que funcionará com um traçador, pois o cloro está presente na maior parte das águas de rega, não é fornecido em quantidades significativas pela maior parte dos solos e entra em muito poucas reacções biológicas.

O cloro (Cl^-) contido na água de rega ou é absorvido pelas plantas ou permanece na água do solo. Desde que o cloro não seja adsorvido ou libertado pela maior parte dos solos, o quociente entre a concentração de Cl^- na água de rega e a concentração de Cl^- na água de drenagem pode ser utilizada para estimar a fracção da água de rega que é lixiviada LF que poderá ser determinada através da seguinte expressão:

$$LF = \frac{(E_t \text{Cl}_i) - \text{Cl}_c}{(E_t \text{Cl}_p) - \text{Cl}_c} \quad (2.12)$$

em que E_t é a evapotranspiração da campanha em Kg de água por ha, Cl_i é a concentração de Cl^- (Kg de Cl^- por Kg de água), Cl_p é a concentração de Cl^- na água do solo abaixo da zona das raízes (Kg de Cl^- por Kg de água) e Cl_c é a quantidade de absorvida pelas plantas (Kg de Cl^- por ha).

O fluxo de drenagem acumulado V_p em Kg/ha é calculado por:

$$V_p = LF \frac{E_t}{1 - LF} \quad (2.13)$$

A quantidade de Cl^- (Kg/ha) na água de rega Cl_a é calculada através do conhecimento da concentração de cloro na água de rega, do volume da água de rega e da quantidade de cloro absorvido pelas plantas através da expressão:

$$Cl_a = Cl_i \left(\frac{V_p}{LF} \right) - Cl_c \quad (2.14)$$

A quantidade de azoto (Kg/ha) lixiviado N_p para a toalha freática é calculada por:

$$N_p = Cl_a \frac{NO_3^- - N_s}{Cl_s} \quad (2.15)$$

em que $NO_3^- - N_s$ é concentração no solo (mg $NO_3^- - N_s$ de por mg de solo) e Cl_s é a concentração do ião cloro no solo (mg de Cl^- por mg de solo).

O método tem algumas limitações, pois assume que existe regime permanente e que o armazenamento de água na zona das raízes é constante, o que nas condições de campo não é comum. Podem também ocorrer precipitações do cloro devido a trocas aniónicas entre o solo e o Cl^- que afectarão também o rigor dos cálculos. O método tem a vantagem de ser simples, rápido e barato, quando comparado com outros métodos que exijam equipamentos dispendiosos.

Moutonnet *et al.* (1993), referem a utilização de um tensiómetro, que permite medir simultaneamente no campo os teores de nitratos e o potencial matricial de pressão, tendo um funcionamento semelhante ao dos tensiómetros e das cápsulas de succão, no campo, numa cultura de milho e que contribuirá também para a determinação da lixiviação dos nitratos.

Recentemente, com o desenvolvimento das novas tecnologias, tem-se estudado a possibilidade do método TDR (Time Domain Reflectometry) que já é utilizado para medir o teor de humidade volúmica do solo e condutividade eléctrica aparente do solo (EC_b), poder ser utilizado para determinar também as concentrações dos nitratos $[NO_3^-]$, através das relações entre as variações da EC_b e as variações nas $[NO_3^-]$, podendo assim estimar-se também as lixiviações dos nitratos (Nissen *et al.*, 1998, Das *et al.*, 1999; De Neve, 1999).

3. ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DA ÁGUA NO SOLO

O solo é um material poroso composto por um esqueleto de partículas minerais e orgânicas com poros entre si, preenchidos por ar e água (Warrick, 1990), sendo a sua estrutura composta fisicamente pela dimensão dos poros, e pela forma e arranjo das suas partículas e seus espaços intersticiais.

As diferenças a nível da capacidade de retenção e do movimento da água no solo são comandadas, em larga escala, pela dimensão e forma de distribuição dos poros do solo. Assim, por exemplo, os poros de maior dimensão conduzem mais água e mais rapidamente que os poros mais finos.

O estudo do movimento da água e transporte de solutos requer o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo (Stolte *et al.*, 1994), nomeadamente as relações entre a tensão de humidade do solo e o teor de humidade do solo, ou a condutividade hidráulica como função da tensão de humidade ou do teor de humidade do solo, para que se possa quantificar a água ao dispor das plantas e modelar a transferência de água e solutos no solo (Rawls *et al.*, 1982).

A partir das relações entre a distribuição e o tamanho dos poros, a intensidade dos fluxos, as sucções, as propriedades hidráulicas do solo podem ser determinadas, a partir do conhecimento das características físicas dos solos.

Apresenta-se, assim, uma breve descrição destes conceitos, com algum realce para a situação do movimento da água no solo a partir de fontes pontuais, como é o caso da rega gota-a-gota com os gotejadores isolados.

3.1 Teor de humidade do solo

O teor de humidade do solo representa a quantidade de água presente no sistema. Existem várias formas de o definir, pelo que a escolha da definição a utilizar é usualmente em função da conveniência (Warrick, 1990).

3.1.1 Formas de exprimir o teor de humidade do solo

As principais formas de exprimir o teor de humidade do solo são:

Teor de humidade gravimétrico θ_m :

$$\theta_m = \frac{\text{massa de água na amostra}}{\text{massa seca de solo na amostra}} \quad (3.1)$$

Teor de humidade volúmica θ_v

$$\theta_v = \frac{\text{volume de água na amostra}}{\text{volume aparente da amostra}} \quad (3.2)$$

O teor de humidade gravimétrico relaciona-se com o teor de humidade volúmica através da expressão:

$$\theta_v = (\rho_b / \rho_w) \theta_m \quad (3.3)$$

onde ρ_b é a densidade aparente do solo e ρ_w é a densidade da água.

Saturação efectiva

O teor de humidade pode ser também representado através da saturação efectiva, Θ .

$$\Theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (3.4)$$

em que θ_s é o teor de água no solo à saturação e θ_r é o teor de água residual (a água que não pode ser extraída pelas forças de capilaridade, ou seja, o teor de água para o qual h tende para $-\infty$). Em muitas situações, considera-se o valor θ_r de zero, mas pode-se considerar um valor superior e que corresponderá a um valor limite, abaixo do qual o teor de humidade não é reduzido apreciavelmente pela diminuição do potencial matricial (Warrick, 1990).

Altura de água

Pode também ser definido pela altura de água, d , numa determinada camada de solo de altura z , expressando a água armazenada em altura. Utiliza-se nas situações de rega e drenagem e:

$$d = \theta_v z \quad (3.5)$$

3.1.2 Determinação do teor de humidade do solo

Nos diversos métodos para determinação do teor de humidade do solo há a considerar os métodos directos e os métodos indirectos. O método gravimétrico é um método directo que apresenta a desvantagem de ser moroso e destrutivo. Os métodos indirectos não são destrutivos e permitem uma análise contínua e em tempo real nos mesmos pontos do terreno. Nos métodos de determinação do teor de humidade do solo há a referir as sondas de neutrões, os blocos de gesso, as sondas por absorção das radiações gama, as sondas TDR e as sondas capacitivas.

Por terem sido os métodos utilizados nos trabalhos de campo, que se descrevem no capítulo 7, apresenta-se uma breve descrição das sondas TDR e das sondas capacitivas.

Sistema Time Domain Reflectometry (TDR)

O TDR é um eficiente e não destrutivo método para determinar a humidade do solo, podendo ser também utilizado para medir a condutividade eléctrica e os teores dos solutos.

O processo consiste na determinação da constante dieléctrica dos materiais, isto é, da razão entre o deslocamento eléctrico no meio e o campo eléctrico que o produz, (Santos, 1997), a qual é relacionada com o teor de humidade volúmica do solo, através de relações empíricas, sob a forma de equações polinomiais de 3^a ordem (Topp *et al.*, 1980). A constante dieléctrica é de cerca de 80 para a água, de 2 a 5 para solo seco e de 1 para o ar (Persson e Berndtsson, 1998), pelo que devido a estas grandes diferenças a constante dieléctrica do meio está altamente correlacionada com o teor de humidade volúmica do solo.

O sistema TDR é um processo que permite a fácil medição do teor de humidade volúmica do solo. Comparado com o processo gravimétrico, este método para além de permitir uma determinação imediata não destrói nem provoca alterações na estrutura dos locais em causa o que permite inúmeras leituras no mesmo ponto do solo.

Neste estudo utilizou-se uma sonda tubular que associada a uma unidade de leitura e a tubos de acesso permite determinar o teor de humidade volúmica de água no solo. A unidade de leitura é ligada por um cabo à sonda propriamente dita. A sonda é composta por um corpo cilíndrico em PVC o qual tem dois pratos de alumínio que são as guias das ondas de TDR.

Para se mediarem os teores de humidade do solo, introduz-se a sonda no interior de tubos de acesso de PVC que se inseriram previamente no solo. Ao longo de todo o comprimento destes é possível medir os teores de humidade, bastando fazer deslizar a sonda ao longo do tubo de acesso. Os tubos de acesso utilizados têm o diâmetro adequado ao diâmetro da sonda, 0.044 m, e dois metros de comprimento, para que se pudessem medir os teores de humidade do solo até à camada impermeável.

Este sistema apresenta como principais vantagens:

- permite leituras às profundidades de 0,1 a 0,2 m, muito importantes nas regas de alta frequência, contrariamente às sondas de neutrões.
- a sua utilização não envolve riscos para a saúde do operador
- determinação imediata
- permite realizar inúmeras determinações num mesmo ponto sem destruição da estrutura do mesmo

- num mesmo ponto podem-se fazer determinações a diversas profundidades através do tubo de acesso fixo no solo
- possibilidade de com uma única sonda se realizarem inúmeras medições em inúmeros pontos a diversas profundidades, o que não é possível com as sondas TDR de “garfos” em que as determinações só se podem fazer a uma única profundidade num ponto fixo.

Como desvantagens do sistema utilizado nestes trabalhos pode-se apontar o facto não ser ligado a “aquisidor de dados”. O sistema também não funciona para valores de condutividade eléctrica do solo superiores a 1 dS/m.

Sondas capacitivas

As sondas capacitivas têm um processo de medição do teor de humidade do solo algo semelhante ao das TDR, pois também determinam o teor de humidade do solo em função da determinação da constante dieléctrica no meio solo-água-ar. Medem também a constante dieléctrica no solo em torno dos seus sensores.

Neste método, um sensor rodeado pelo solo constitui o “capacitador”. Quando um capacitor contém solo como isolador entre os dois eléctrodos, as determinações da constante dieléctrica do solo podem ser utilizadas para a determinação do teor de humidade do solo.

A sonda utilizada consiste num tubo plástico que contém no seu interior um dispositivo electrónico, ligado através de um cabo vertical a uma série de sensores capacitivos, colocados por “andares”. Os sensores capacitivos são constituídos por dois aros de metal de 0,051 m de diâmetro e 0,025 m de altura, instalados num corpo sensor de plástico, separados por um aro de plástico de 0,012 m. A sonda é introduzida num tubo de acesso de PVC, ficando os sensores separados por 0,0004 m da parede interior do tubo de acesso. A condutividade dos aros do sensor é que forma o capacitor, a partir da qual é calculada a constante dieléctrica do meio, através de um processo descrito por Paltineanu e Starr (1997).

Estas sondas são relativamente insensíveis à salinidade devido às suas altas frequências, cerca de 150 MHz.

Este tipo de sonda tem as vantagens apontadas para a TDR e também a de estar ligada a um “aquisidor de dados” permitindo registos contínuos.

3.2 Potencial da água no solo

O potencial da água do solo, ou carga hidráulica, é formalmente definido como o trabalho necessário para transferir uma quantidade unitária de água, desde um ponto de referencia (potencial zero) até ao ponto em causa (Warrick, 1990). Pode-se resumir como “a energia potencial por unidade de massa de água”.

Pode-se considerar o potencial total da água do solo como resultante das interacções de diversos factores tais como a pressão, a cota geométrica e os solutos presentes, através de:

$$H_T = H_g + H_p + H_m + H_\pi \quad (3.6)$$

Onde H_T é o potencial total, H_g o potencial gravitacional, H_m o potencial matricial e H_π o potencial osmótico.

Escolhendo como unidades a energia por unidade de peso, e juntando os efeitos dos potenciais de pressão e o matricial, a expressão (3.6) pode tomar a forma de:

$$H = z + h + \pi \quad (3.7)$$

Em que z é a altura acima ou abaixo da referência em causa, h é a carga de pressão, incluindo as componentes de pressão e matricial, e π é a carga osmótica.

Na maior parte das situações de campo, h será positivo e a pressão da água positiva nas condições de saturação e que será negativo nas condições de não saturação em que corresponderá ao potencial matricial.

3.2.1 Perfis de carga

A distribuição dos potenciais de pressão, de gravidade e total ao longo de um perfil vertical pode ser representada graficamente, através de diagramas, designados por perfis de carga hidráulica, constituídos pelos perfis de carga de pressão, carga gravitacional e de carga hidráulica que permitem caracterizar as transferências de água e de solutos na zona não

saturada, com a direcção e o sentido do escoamento, dependendo da forma e do declive dos perfis de carga total (Santos, 1997). Na figura 3.1 exemplifica-se um perfil de carga para um solo em evaporação.

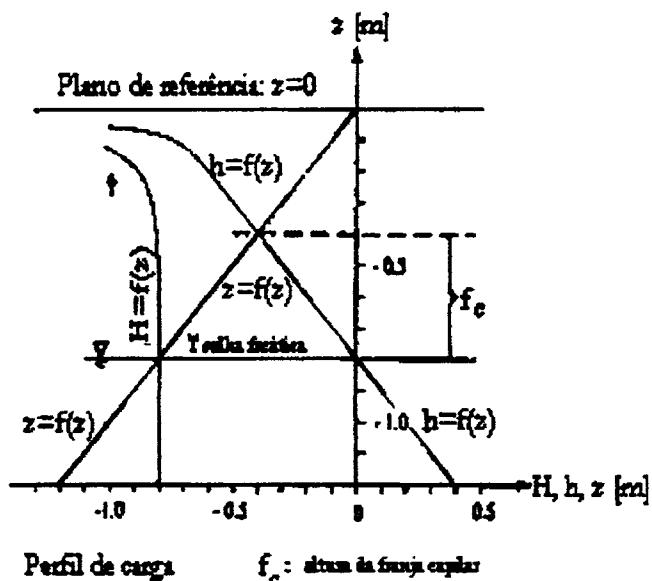


Figura 3.1 Perfil de carga. Fonte: Santos (1997)

3.3 Retenção de água no solo

A água no solo está retida nos poros sob tensão. A medida da tensão de humidade ou sucção indica a energia que as raízes terão que despender para conseguir absorver a água ou a energia necessária para remover a água de um determinado poro, sendo mais fácil remover a água de um poro maior que dum poro de menores dimensões.

O poder de retenção da água pelo solo está intimamente relacionado com o teor de humidade do solo e também com o seu tipo de porosidade. Assim, à medida que o solo vai perdendo água aumenta a resistência à perda de água. Por outro lado, os solos com maiores poros retém menos água, para uma determinada força de sucção, que os solos com poros de menores dimensões. Isto é devido a que os poros mais pequenos têm capilaridade mais estreita, exercendo uma grande sucção, maior que a exercida pelos poros maiores.

3.4 Curvas características de humidade do solo

A relação entre o potencial matricial e o teor de humidade volúmica do solo pode ser representada através das curvas características de humidade, também designadas por curvas

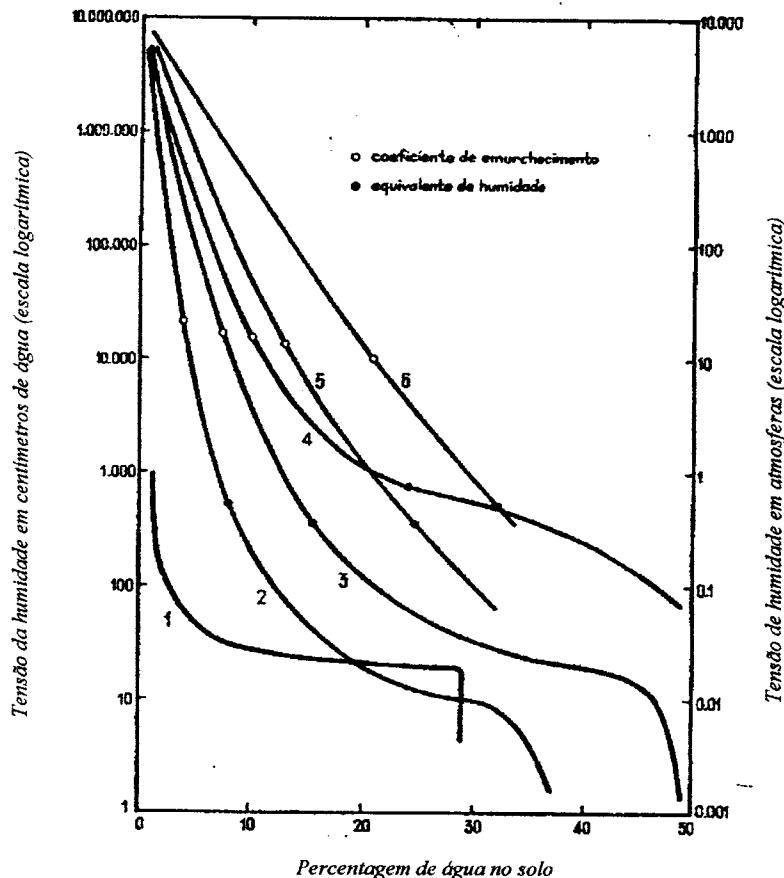


Figura 3.2 Curvas de tensão de humidade de vários solos, obtidas por dessecação.
 1 – arenoso; 2- arenoso fino; 3- franco-arenoso; 4- franco; 5- franco-limoso;6- argilo-limoso.
 (segundo dados de Schofield e Costa, 1935; Russel, 1939; Richards e Weaver, 1944)

Adaptado de Costa (1973).

de tensão de humidade do solo ou curvas de pF , que relacionam a força de retenção da água no solo com o respectivo teor de humidade. Cada tipo de solo tem a sua curva característica, daí a designação deste tipo de curvas. Geralmente, num eixo apresentam o teor de humidade volúmica (percentagem de volume de água no solo) e no outro a tensão de humidade, em centímetros (ou outras unidades como bares, atmosferas, etc.) na escala logarítmica. Para efeitos de representação gráfica, devido aos valores negativos bastante elevados que pode

atingir, o potencial matricial pode-se exprimir na escala logarítmica, definida pelo logaritmo decimal da sucção matricial $|\psi_m|$ e que Schofield (1935) propôs designar por pF :

$$pF = \log_{10}|\psi_m| = \log_{10}(-h) \quad (3.8)$$

O pF é assim o logaritmo da altura, em centímetros da coluna de água, que exerce pressão equivalente à força de retenção ou atracção do solo para a água (Costa, 1973).

Estas curvas servem para descrever o movimento de água no solo e mostram que a tensão de humidade é tanto maior quanto menor é o teor de água no solo e que ao mesmo teor de água no solo podem corresponder, em solos diferentes, forças de retenção muito diferentes.

Mostram também que em solos diferentes o teor de água com uma dada força de retenção pode variar bastante (Costa, 1973).

A forma da curva é fortemente influenciada pela classe de textura do solo e dentro de uma mesma classe de textura também difere devido a diferenças de granulometria, tipo de argila, diferentes teores de matéria orgânica e diferenças de microestrutura com ela relacionadas (Costa, 1973).

As curvas apresentam também histerese; ou seja, apresentam diferentes desenvolvimentos consoante o solo está em fase de humedecimento ou de secagem.

Definindo um raio efectivo através de uma equação para a capilaridade, o potencial matricial corresponde a um determinado raio e a curva característica de humidade é equivalente à distribuição das dimensões dos poros.

O raio efectivo r_{ef} para um determinado potencial matricial h é definido por uma equação como a seguinte:

$$r_{ef} = 2\sigma \cos(\gamma)/(\rho_w g |h|) \quad (3.9)$$

em que σ é a tensão superficial da água e γ o ângulo e contacto da água formado pelo ar e pelo material do solo. Geralmente, por falta de um melhor valor, considera-se que γ é igual a zero. Valores elevados de h (perto de zero) correspondem a elevados r_{ef} e valores baixos correspondem a baixos valores de r_{ef} . O facto de nos solos de texturas grosseiras o teor de humidade descer rapidamente sob baixos valores de tensão é devido a um predomínio de poros de grandes dimensões, enquanto que nos solos de texturas mais finas o decréscimo

mais gradual do teor de humidade corresponder a uma maior distribuição de dimensões de poros e a uma grande parte de poros de pequenos.

3.4.1 Relações entre o teor de humidade do solo e a força de retenção

Com o objectivo de ajustar os valores obtidos em laboratório para deduzir as curvas características de humidade, desenvolveram-se diversas expressões matemáticas empíricas que relacionam os teores de humidade do solo com as forças de retenção correspondentes, sendo as mais conhecidas as seguintes:

Expressão de Gardner

$$h(\theta) = -a\theta^{-b} \quad (3.10)$$

em que h é o potencial de pressão (L), θ é o teor de humidade do solo (L^3/L^3), e a e b são constantes empíricas características do solo

Expressão de Brooks e Corey

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_e}{h} \right)^\lambda \quad \text{para } h \leq h_e \quad (3.11)$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad \text{para } h \geq h_e \quad (3.12)$$

em que h_e é a pressão de entrada do ar, a mais pequena pressão capilar para a qual existe uma fase gasosa contínua e λ é um parâmetro característico da porosidade do solo (Santos, 1997).

A expressão (3.11) também se pode apresentar através da definição de saturação efectiva Θ .

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \Theta = \left(\frac{h_e}{h} \right)^n \quad (3.13)$$

Segundo Rawls *et al.* (1982) a equação de Brooks e Corey representa satisfatoriamente as relações entre o teor de humidade e o potencial matricial para valores de tensão superiores a 0,50 m.

Expressão de Van Genuchten

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3.14)$$

em que α , m e n são parâmetros empíricos constantes e em que $m=1-1/n$

A expressão de Van Genuchten também se pode apresentar através da definição de saturação efectiva:

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3.15)$$

3.5 Movimento da água no solo

O movimento da água no solo depende das diferenças de potencial (carga hidráulica) entre os diversos ponto do solo e também da permeabilidade, associada à condutividade hidráulica (ΔH). A água move-se, assim, devido aos gradientes de potencial capilar e do potencial gravitacional e, no estado líquido, tende a mover-se dos pontos de maior potencial para os de potencial inferior.

Para haver movimento de água no solo de um ponto para outro é necessário que exista

diferença de potencial total (ou carga hidráulica) entre os dois pontos - ΔH maior ou menor que zero - e que o solo seja permeável. A direcção e a intensidade do fluxo dependem, assim, das diferenças de carga hidráulica entre os diferentes pontos do solo.

3.5.1 Expressão geral do movimento da água no solo

O fluxo da água no solo pode-se representar pela equação de Darcy:

$$q = -K \text{ grad}H \quad (3.16)$$

onde q é o fluxo, com as dimensões da velocidade, H a carga hidráulica e $\text{grad } H$ o gradiente de potencial entre dois pontos e K é um coeficiente de proporcionalidade conhecido pela condutividade hidráulica. O sinal negativo na equação deve-se ao facto de o sentido do escoamento ser o do potencial total decrescente.

A condutividade hidráulica K é função não só do meio poroso como também do fluido. Tal significa que num mesmo meio, dois fluidos diferentes terão fluxos diferentes, devido às suas diferentes características. As propriedades condutivas de um meio poroso são, assim, descritas através do conceito de permeabilidade intrínseca ou apenas permeabilidade. A condutividade relaciona-se com a permeabilidade através da expressão:

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \quad (3.17)$$

em que k é a permeabilidade intrínseca, ρ a massa volúmica, g a aceleração da gravidade e μ a viscosidade dinâmica.

3.5.2 Relações entre a condutividade hidráulica e o teor de humidade do solo

Para determinação as relações entre a condutividade hidráulica e a tensão de humidade, em função do teor de humidade do solo, têm sido concebidos vários modelos matemáticos

para prever os fluxos de água e de solutos nas regas e lixiviações de nutrientes (Shani *et al.*, 1987).

Nas condições de saturação o potencial matricial é nulo e o teor de água é máximo, sendo a condutividade hidráulica constante e designando-se, neste caso, por condutividade hidráulica saturada.

Nas condições de instauração, à medida que o solo perde água a carga de pressão diminui, aumenta a tortuosidade, diminui a velocidade e a condutividade hidráulica também diminui rapidamente passando do seu valor máximo, nas condições de saturação, para valores cada vez menores (Miyazaki, 1993).

As condutividades hidráulicas saturada e não saturada estão ambas relacionadas com o grau de resistência das partículas do solo quando a água circula nos poros (Miyazaki, 1993). Essas resistências são influenciadas pelas formas, dimensões, tamanhos, ramificações, ligações e tortuosidades dos poros, assim como pela viscosidade da água; a condutividade hidráulica insaturada é fortemente afectada pelo teor de humidade volúmica de água no solo (Miyazaki, 1993).

A diminuição do teor de água no solo provoca uma diminuição na secção do fluxo, um aumento na resistência ao fluxo e também um aumento no percurso do fluxo, sendo estas as razões para a diminuição muito rápida da condutividade hidráulica insaturada com a diminuição do teor de água no solo.

As determinações reais da condutividade hidráulica insaturada são difíceis de obter, em parte por causa as grande variabilidade do solo e, por outro lado, porque essas estimativas são morosas e caras (Van Genuchten, 1980), o que motivou que tivessem sido desenvolvidas nos últimos anos diversos modelos matemáticos para relacionar a condutividade hidráulica insaturada com a tensão de humidade do solo ou com os teores de humidade, de modo a que os valores determinado em laboratório ou no campo possam ser ajustados através de fórmulas empíricas funcionais.

Uma das expressões desenvolvidas para relacionar a condutividade hidráulica com o potencial matricial de pressão, foi a relação empírica de Gardner (1958):

$$K(h) = K_s \cdot e^{\alpha \cdot h} \quad (3.18)$$

em que α é um parâmetro característico do solo, correspondendo ao declive da relação exponencial entre a condutividade hidráulica $K(h)$ e a condutividade hidráulica, nas condições de saturação K_s .

Brooks e Corey (1964), baseados na teoria de Burdine (1953), citados por Van Genuchten (1980), estabeleceram as seguintes relações entre a condutividade hidráulica e a pressão matricial do solo e entre o teor de humidade do solo e a pressão matricial do solo, a partir de um elevado número de dados experimentais:

Para relacionar a condutividade hidráulica com o potencial matricial de pressão:

$$K(h) = K_s \left(\frac{h_e}{h} \right)^{2+3\lambda} \quad h > h_b \quad (3.19)$$

$$K(h) = K_s \quad h \leq h_e \quad (3.20)$$

e para a relacionar com o teor de humidade:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2/\lambda} \quad (3.21)$$

em que h_e é a pressão de entrada do ar nos poros, e λ é um parâmetro característico do solo, θ_s é o teor de água no solo à saturação e θ_r é o teor de água residual e K_s a condutividade hidráulica saturada.

A expressão (3.21) também se pode apresentar sob a forma:

$$K(\theta) = K_s \Theta^\epsilon \quad (3.22)$$

Segundo Van Genutchen (1980) existe um ponto de descontinuidade nos declives das curvas características de humidade e da condutividade hidráulica insaturada obtidas através da aplicação da expressão de Brooks e Corey e que tais descontinuidades impedem a rápida convergência em problemas de resolução numérica em situações de saturação e de não saturação. Essas descontinuidades correspondem a um mesmo valor negativo do potencial de pressão, sendo esse ponto, geralmente, referido como a pressão de entrada do ar.

Van Genutchen (1980), baseado no modelo de Mualem (1976), estabeleceu uma outra

expressão para relacionar a condutividade hidráulica com o respectivo teor de humidade e a condutividade hidráulica saturada que, segundo o autor, permite uma boa descrição da curva característica do solo, permitindo também uma rigorosa predição da condutividade hidráulica insaturada.

Assim para relacionar a condutividade hidráulica com o potencial matricial de pressão, estabeleceu a seguinte expressão:

$$K(h) = K_s \frac{\left\{1 - (\alpha h)^{n-1} \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{m/2}} \quad (3.23)$$

Para relacionar a condutividade hidráulica com o teor de humidade, estabeleceu a seguinte equação:

$$K(\theta) = K_s \Theta^{1/2} \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (3.24)$$

em que α e $m=1/n$ são constantes empíricas e n um parâmetro obtido do ajustamento da função $h(\theta)$ de Van Genutchen.

Ainda segundo Van Genutchen (1980), as curvas de humidade dos dois modelos são semelhantes para valores baixos de θ . Quando os valores de θ são elevados ocorrem diferenças acentuadas entre os dois modelos, principalmente quando θ se aproxima das condições de saturação.

A determinação da condutividade hidráulica é sempre problemática, pois praticamente para cada tipo de textura do solo haverá um modelo mais apropriado, de acordo com Alexander e Skaggs (1986), que analisaram 14 métodos diferentes para estimar a condutividade hidráulica insaturada em função das características hidráulicas, em 23 tipos de solos, com medições das $K(h)$, em laboratório, para comparação com os valores obtidos, testando, assim, esses métodos.

Observaram que o método que apresentou melhores resultados, tanto para solos argilosos, como para fracos ou arenosos, foi uma variante do método de Campbell, em que a expressão é semelhante à de Brooks e Corey. No entanto, a equação apresenta tendência para sobreestimar os valores de cálculo face aos determinados em laboratório.

Expressão de Campbell modificada por Alexander e Skaggs:

$$K(h) = K_s \left(\frac{h_e}{h} \right)^{\frac{3}{b}} \quad h > h_e \quad (3.25)$$

$$K(h) = K_s \quad h \leq h_e \quad (3.26)$$

em que b e h_e são obtidos através do ajustamento de uma recta correspondente a $\log(h)$ em função do $\log(\Theta)$.

Alexander e Skaggs (1986) concluíram também que a expressão de Van Genutchen tende a subestimar todos os valores de $K(h)$ enquanto que quase todos os outros, incluindo o de Brooks e Corey, apresentavam tendência para a sobreestimar em situações próximas da saturação e a subestimá-la para os teores de humidade mais baixos, face aos valores medidos em laboratório.

Santos (1994) concluiu através de observações no campo, num solo de textura arenosa, que nessas condições o expoente da expressão (3.21) se aproximava mais de $2,5 + 2/\lambda$.

3.5.3 Movimento unidimensional vertical da água no solo em condições de saturação

No âmbito agronómico, o estudo do movimento da água em condições de saturação interessa essencialmente para problemas de captação de águas subterrâneas e de drenagem (Costa, 1973).

Nestas condições, o movimento da água é devido à gravidade e obedece em geral à lei de Darcy (1856), segundo a qual a velocidade de filtração da água através dumha coluna de material poroso é directamente proporcional à diferença de carga entre duas secções dessa coluna e inversamente proporcional à distância entre elas (Costa, 1973), podendo-se representar o escoamento unidimensional vertical por:

$$q = -K_z \frac{dH}{dz} \quad (3.27)$$

em que q é fluxo (L/T), K é a condutividade hidráulica saturada (L/T), H é o potencial total (L) e z é a cota geométrica

A presença do sinal negativo nesta equação resulta do facto de o sentido do escoamento e do fluxo corresponder ao do potencial total decrescente.

O escoamento em meio saturado é representado pela equação de Laplace, resultante da combinação da equação dinâmica de Darcy e da equação da continuidade, através das relações apresentadas em Santos (1997):

$$\vec{q} = -K_s \vec{grad} H \quad (3.28)$$

$$div \vec{q} = 0 \quad (3.29)$$

Para se obter que:

$$div(-K_s \vec{grad} H) = 0 \quad (3.30)$$

Se o meio é homogéneo e isotrópico tem-se

$$div \vec{grad} H = \vec{V}^2 H = 0 \quad (3.31)$$

Com o operador de Laplace definido por:

$$\vec{V}^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \quad (3.32)$$

No escoamento unidimensional vertical considerar-se-á só a componente vertical:

$$\vec{V}^2 = \frac{\delta^2}{\delta z^2} \quad (3.33)$$

3.5.4 Movimento unidimensional vertical da água no solo em condições de não saturação

As situações mais comuns em que se processam as transferências de água e dos solutos no solo, como, por exemplo, nas regas, ocorrem em condições de não saturação, nas quais os poros do solo só estão parcialmente preenchidos com água, existindo também uma fase gasosa, sendo o fluxo completamente diferente de quando o solo está saturado.

Nestas circunstâncias, a intensidade das forças de retenção e o correspondente potencial de pressão variam com o teor de água no solo, assim como a condutividade hidráulica, daí resultando que o gradiente do potencial total e a intensidade do fluxo variem não só de ponto para ponto no solo, como também no mesmo ponto ao longo do tempo (Santos, 1997).

O movimento unidimensional vertical nas condições de não saturação representa-se, usualmente, ignorando o fluxo do ar e combinando a equação diferencial da conservação da massa (Smith, 1983):

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} + \frac{\delta q}{\delta z} = 0 \quad (3.34)$$

com o fluxo q , obtido através da lei de Darcy

$$q = -k(\theta) \left[\frac{\delta h}{\delta z} - 1 \right] \quad (3.35)$$

para se obter a equação de Richards (1931):

$$\frac{\delta\theta}{\delta z} - \frac{\delta}{\delta z} \left(K \frac{\delta h}{\delta z} \right) + \frac{\delta K}{\delta z} = 0 \quad (3.36)$$

em que θ é o teor de água no solo (L^3/L^3), h é a tensão de humidade no solo (L), t é o tempo (T), z é a profundidade (L) e $k(\theta)$ é a condutividade hidráulica insaturada (L/T)

Por analogia com a equação de difusão - convecção a equação (3.36) pode ser transformada em:

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{\delta h}{\delta \theta} \quad (3.37)$$

em que $D(\theta)$ é o coeficiente da difusividade capilar ou simplesmente difusividade.

Combinando-a com a equação (3.36) obtém-se:

$$q = -D(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta z} + k(\theta) \quad (3.38)$$

e a equação, diferencial não linear, de Richards, também conhecida por equação de Fokker-Planck:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} - \frac{\delta}{\delta z} \left[D(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta z} - k(\theta) \right] = 0 \quad (3.39)$$

com condições de fronteira:

$$\theta = \theta_n \quad z \geq 0; t=0$$

$$\theta = \theta_0 \quad z = 0; t>0$$

à qual se deverá adicionar o termo S que será negativo se corresponder à extracção de água pelas raízes e positivo se corresponder à adição de água num ponto interior do solo como uma rega, por exemplo.

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} - \frac{\delta}{\delta z} \left[D(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta z} - k(\theta) \right] + S = 0 \quad (3.40)$$

3.6 Movimento da água no solo a partir de uma fonte pontual

Matematicamente, o movimento da água a partir de uma fonte pontual, como um gotejador, é essencialmente um problema tridimensional do movimento saturado-insaturado com uma fronteira móvel separando a área inundada da não saturada à superfície do solo (Lafolie *et al.*, 1989 a). O movimento da água, nestas condições, ocorre como resposta à atracção capilar e o movimento descendente resulta da acção da gravidade (Clothier *et al.*, 1985). A textura do solo, ou principalmente a geometria dos poros do solo, determina a importância relativa da gravidade e das forças capilares, pelo que o movimento da água no solo, aplicada por um gotejador, é dominada pelas propriedades físicas do solo.

A água é aplicada com um débito constante num ponto da superfície do solo criando-se um pequeno charco. Junto ao gotejador o solo fica saturado, mas o teor de humidade diminui, gradualmente, das zonas mais interiores do círculo para a periferia, designada por frente de humedecimento, por cada vez ser menor a diferença de potencial entre os pontos mais distantes do gotejador, até que não há movimento, nem humedecimento dos pontos adjacentes.

A área do charco aumenta com o tempo até atingir um máximo da área circular humedecida (Brandt *et al.*, 1971; Bresler, 1977; Warrick, 1985; Shani *et al.*, 1987). A água move-se, na superfície do solo, em torno do gotejador até a que taxa de infiltração na zona inundada iguala o débito do gotejador (Clothier *et al.*, 1985). Quando o raio da superfície inundada atinge o valor máximo, pode-se assumir que se atingiu o escoamento permanente e que as equações para o escoamento permanente podem ser utilizadas para determinar o fluxo “q” a partir do charco (Shani *et al.*, 1987).

O movimento da água no solo a partir de uma fonte pontual é descrito por equações de infiltração tridimensional. As considerações que a seguir se apresentam foram retiradas de Clothier *et al.* (1984).

A infiltração tridimensional num solo uniforme pode ser descrito pela expressão de Philip (1968):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla \theta) - \left(\frac{dK}{d\theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3.41)$$

onde θ é o teor de humidade volúmica, t é o tempo, D é a difusividade da água no solo, ∇ é o operador de Laplace, K é a condutividade hidráulica e z a profundidade. As condições de

fronteira iniciais que descrevem o fluxo constante da infiltração a partir de uma cavidade hemiesférica são:

$$\theta = \theta_n, \quad r > r_0, \quad t = 0 \quad (3.42)$$

$$v = v_0 = \frac{Q}{2\pi_0 2}, \quad r = r_0, \quad t > 0 \quad (3.43)$$

em que θ_n é o teor de humidade inicial, r é a distância radial, r_0 é o raio da cavidade, v é a densidade do fluxo, v_0 é a densidade correspondente a r_0 , e Q é o débito do aplicador (gotejador) na cavidade, assumindo que a superfície da cavidade é totalmente uniforme.

Para tempos curtos o termo correspondente à gravidade na equação (3.41) é tido como insignificante, pelo que a infiltração deverá aproximar-se da absorção radialmente simétrica. Neste caso, Philip e Knight (1974) definiram a relação de concentração do fluxo como:

$$F = \left(\frac{r^2}{r_0^2} \right) \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (3.44)$$

em que F é uma função dependente do teor de humidade de modo que $0 < F < 1$. Clothier e Scotter (1982) introduziram o termo F na expressão da lei de Darcy e na equação da continuidade para obterem expressões para a distribuição do teor de humidade $r(\theta, \theta_0)$ e para determinar o tempo que a cavidade demora a alcançar esse teor de humidade $t(\theta_0)$:

$$r(\theta, \theta_0) = r_0 \left[1 - (v_0 r)^{-1} \int_{\theta}^{\theta_0} (D/F) \partial \theta \right]^{-1} \quad (3.45)$$

$$t(\theta_0) = (r_0 / 3v_0) \int_{\theta_0}^{\theta_0} \left[1 - (v_0 r_0) \int_{\theta}^{\theta_0} (D/F) \partial \theta \right]^{-3} \partial \theta \quad (3.46)$$

As expressões (3.45) e (3.46) deverão determinar aproximadamente a infiltração em solos permeáveis, principalmente para intervalos de tempo curtos.

A teoria do movimento da infiltração a partir de um fonte pontual, em condições de não saturação, pode ser representada através da linearização do potencial fluxo matricial, pela transformação de Kirchhoff:

$$\phi = \int_{\theta_n}^{\theta} D(\theta') d\theta' = \int_{h_n}^h K(h') dh \quad (3.47)$$

em que D é a difusividade, θ é o teor de humidade volúmica, h é o potencial de pressão e K a condutividade hidráulica que é função exponencial do potencial de pressão pela expressão de Gardner (1958):

$$K(h) = K_s e^{\alpha h} \quad (3.48)$$

em que α é um parâmetro do solo, é o declive da função exponencial $K(h)$, q é o fluxo e h o potencial de pressão.

vindo então:

$$K = \alpha \cdot \phi \quad (3.49)$$

Por forma a simplificar a equação (3.41), Wooding (1968), propôs uma expressão para o escoamento permanente a partir de uma superfície humedecida, de raio r :

$$q = \frac{Q}{\pi r^2} = K_s + \frac{4}{\pi} \frac{1}{r} \phi \quad (3.50)$$

em que q é o fluxo a partir da zona humedecida, K_s é a condutividade hidráulica saturada, r é o raio da zona humedecida, Q é o débito da fonte pontual (gotejador, por exemplo) e ϕ é função do fluxo matricial segundo o representado na equação (3.52).

O termo da K_s equação (3.50) representa o fluxo devido ao movimento gravitacional considerando que o 2º termo aparece devido somente aos gradientes da carga matricial. O segundo termo no lado direito da equação (3.50) é similar para a solução (não pré-assumindo a relação $K-h$) para o escoamento permanente bidimensional a partir de uma fonte de disco como resultado somente da adsorção.

Raats (1971) propôs a expressão:

$$\Phi(R, Z) = \frac{\alpha Q}{4\pi} \left[\frac{1}{\rho} \exp(Z - \rho) - \exp(2Z) E_1(Z + \rho) \right] \quad (3.51)$$

onde $R = \alpha r/2$, $Z = \alpha z/2$, $\rho^2 = R^2 + Z^2$ e E_1 é o integral exponencial, definido por:

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{\exp(-t)}{t} dt \quad (3.52)$$

3.6.1 Movimento dos solutos a partir de uma fonte pontual

A exemplo do movimento da água, também o movimento de solutos a partir de fontes pontuais tem também características que interessará referir.

Khan *et al.* (1996), num trabalho de campo realizado num solo franco-arenoso, estudaram o movimento de solutos aplicados através de gotejadores, em função dos débitos dos gotejadores, das concentrações do soluto e dos volumes aplicados, tendo determinado a evolução das concentrações. O soluto utilizado foi o brometo de potássio.

Utilizaram gotejadores de três débitos diferentes, de 1,5, 2,0 e 2,5 L/h, tendo testado a aplicação de três volumes diferentes de solução, 15, 20 e 25 L, e três concentrações diferentes de solução, 100, 300 e 500 mg/L.

Aplicando volumes diferentes de solução, mas com uma mesma concentração de 300 mg/L, através de gotejadores com débito de 2 L/h, observaram que as maiores concentrações de solutos ocorreram nos 0,25 m superficiais, aumentando as concentrações com os volumes aplicados.

Da aplicação de um mesmo volume de solução, 20 L, através de gotejadores de igual débito, 2 L/h, mas testando três concentrações de soluto diferentes, 100, 300 e 500 mg/L, não se registaram diferenças a nível do movimento horizontal, em que a água e o soluto moveram-se à mesma velocidade, tendo no entanto sido observado que no movimento vertical, principalmente nas duas concentrações mais baixas, a água avençava um pouco à frente do soluto.

Relativamente à influência do débito dos gotejadores, aplicando iguais volumes, 20 L, e iguais concentrações, 300 mg/L, concluíram que não havia diferenças no movimento horizontal do soluto, tendo verificado que o movimento vertical do soluto era maior quando os débitos dos gotejadores eram menores.

Após as aplicações, as concentrações finais da solução aumentaram junto dos

gotejadores, até profundidades de cerca de 0,25 m e de distâncias radiais de 0,30 m, quando aumentaram os débitos dos gotejadores, os volumes aplicados e as concentrações do soluto, não havendo grandes diferenças para além destas distâncias.

A distribuição simultânea da água e dos solutos nos meios porosos é diferente nas direcções horizontais e verticais. Assim, no movimento horizontal os solutos e a água sobrepõem-se, enquanto que no movimento vertical a água move-se um pouco mais depressa que os solutos, colocando a hipótese de que quando a condutividade hidráulica é baixa o soluto mover-se-á mais lentamente que a água. Os solutos movem-se mais na direcção horizontal que na vertical, tendo observado que o movimento horizontal era superior ao vertical em cerca de 20%, acentuando-se esta tendência com o aumento do débito dos gotejadores.

3.7 Absorção da água pelas raízes

Os sistemas radiculares são compostos por 2 tipos de raízes: raízes principais descendentes e as raízes laterais e suas ramificações (Klepper, 1991). As raízes principais servem principalmente para conduzir a água captada pelas raízes ramificadas (Klepper, 1991).

Klepper (1991) refere que a rega influencia o desenvolvimento radicular a nível do teor de humidade do solo, da taxa de difusão do oxigénio (ODR) e a tensão de humidade do solo, estando estes factores interrelacionados. Assim, quando o teor de humidade está mais seco, a ODR será mais favorável e tensão de humidade menos favorável, enquanto que nos solos com o teor de humidade acima da capacidade de campo, a ODR limita o desenvolvimento radical e mas a tensão de humidade é favorável. Michelakis *et al.* (1993) observaram que a maior concentração das raízes de abacateiros, regados por regagota-a-gota, num solo de textura franco-argilosa, não era por baixo dos gotejadores mas sim em zonas mais superficiais e periféricas devido a valores mais elevados da ODR.

As raízes próximas da superfície do solo são as que absorvem as maiores quantidades de água e de nutrientes e ao contrário do que é geralmente considerado, as raízes próximas da superfície do solo podem absorver água quando o teor de humidade do solo é inferior ao coeficiente de emurchecimento (Clothier e Green, 1994). Segundo Clothier e Green (1994), como conclusão de um trabalho realizado com kiwis, as raízes que são constantemente humedecidas têm uma maior capacidade de absorção do que as raízes que estão mais tempo

em condições de secura; a profundidade alcançada pelo sistema radical funcionará como um único perfil de extração que perde eficiência à medida que se fasta da superfície do solo.

Quando os solos são mantidos relativamente húmidos por frequentes regas, a maior parte da água é absorvida na parte superficial do perfil do solo, devido à relação dinâmica entre a água do solo e o crescimento das raízes e também por causa dos processos físicos de extração da água (Klepper, 1991), em que a tradicional regra instituída para pomares na Califórnia que indica que 40% das raízes se concentram nos primeiros 0,30 m, e em 30, 20 e 10% nas sucessivas camadas de 0,30 m subjacentes assentará nesses princípios.

A capacidade de absorção de água e de solutos pelas raízes depende do desenvolvimento do seu sistema radical e este depende do transporte de hidratos de carbono e das hormonas, a partir da parte aérea das plantas e das condições físicas e químicas do solo (Bar-Yosef, 1999). A absorção radical é possivelmente um dos componentes do balanço hídrico mais difíceis de quantificar.

De acordo com Gardner (1991), a partir da popularmente aceite analogia com a lei de Ohm, pode-se representar o escoamento permanente através da expressão que representa o transporte da água desde um volume unitário de solo até às folhas da planta F :

$$F = \frac{(H_p - H_s)}{(R_p + R_s)} \quad (3.53)$$

em que H_p representa a carga hidráulica num determinado ponto da planta, H_s é a carga hidráulica no solo, R_p é a resistência ao movimento da água, no interior da planta e R_s é a resistência ao movimento da água no solo.

Segundo Klepper (1991), a absorção de água por camadas individuais de solo, com diferentes teores de humidade, pode ser representada pela expressão:

$$U_i = V_i D_i K_i \left(H_{si} - H_p + H_{zi} + \sum_{j=1}^i \Delta H_{fj} \right) \quad (3.54)$$

em que V_i é o volume de solo na camada, D_i é a densidade das raízes na camada, K_i é a permeabilidade do sistema raiz-solo, H_{si} é o potencial da água do solo na camada, H_p é o

potencial da água no xilema à superfície, H_z é a perda de potencial devida à elevação e ΔH_f é a perda de potencial entre duas camadas devida à fricção no movimento da coluna de água.

Ainda segundo Gardner (1991), os modelos unidimensionais de absorção de água podem-se representar através da expressão geral de Molz (1991):

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(\frac{D(\theta)\delta\theta}{\delta z} \right) - \frac{\delta K(\theta)}{\delta z} - S(z, R, t, \theta) \quad (3.55)$$

onde θ é o teor de humidade do solo, D é a difusividade da água do solo, z é a profundidade, K é a condutividade hidráulica insaturada e S é o termo do sumidouro que descreve o processo de absorção.

Molz (1971), citado por Gardner (1991), determina o sumidouro através de:

$$S(z, t, \theta) = T \left[\frac{D(\theta) R(z, t)}{\int_0^z D(\theta) R(z, t) dz} \right] \quad (3.56)$$

em que $R(z, t)$ representa a distribuição das raízes em termos de comprimento de raízes por unidade de volume de solo.

Segundo Miyazaki (1993, a absorção de água pelas raízes, considerando que o fluxo é radial, pode-se descrever através da expressão:

$$q = -2\pi r K \frac{d\phi_m}{dr} \quad (3.57)$$

em que q é a taxa de absorção de água por unidade de comprimento de raiz r é a distância a partir do pelo radical e K é a condutividade hidráulica do solo.

4 A REGA GOTA A GOTA

Nos últimos anos generalizou-se no Algarve a utilização dos métodos de rega localizada. As principais razões terão sido:

- os custos e as dificuldades no recrutamento da mão de obra;
- a maior poupança de água, associada à sua maior eficiência de aplicação;
- a possibilidade de se estender o regadio a solos mais declivosos e pedregosos, como os do barrocal do Algarve que pelos métodos tradicionais de rega de superfície não poderiam ser regados;
- a possibilidade de se utilizar água de deficiente qualidade, com teores de sais algo elevados;
- a facilidade de incorporação nos locais precisos, onde as raízes estão mais activas, e de controlo das quantidades de fertilizantes, de acordo com as necessidades das culturas;
- a possibilidade também de aplicação de insecticidas e herbicidas;
- o facto de não molhar as plantas, nem ser afectada pelo vento, permitindo o uso de águas de inferior qualidade.

Foi no fim da década de setenta que começaram a aparecer no Algarve os primeiros sistemas de rega localizada, muitas vezes não sendo mais que simples orifícios abertos nos tubos de distribuição. Utilizou-se depois o microtubo, de diâmetros internos inferiores a 0,005 m, directamente inserido nas condutas de distribuição, em que o débito é função da pressão de serviço, do diâmetro e do comprimento do microtubo. Começaram a utilizar-se também os gotejadores propriamente ditos, importados, principalmente, de Israel e Espanha.

Paralelamente surgiram também os miniaspersores e os microaspersores de diferentes características e de diversas origens que distribuem a água por um processo semelhante aos dos aspersores. Tratam-se de equipamentos em que o débito dos aplicadores também é função da pressão o que obriga a um dimensionamento hidráulico bastante rigoroso, devido

aos relativamente elevados débitos, cerca de 30 a 150 L/h, por forma a não existirem diferenças de carga significativas ao longo dos ramais de distribuição que possam originar grandes diferenças de débitos dos aplicadores ao longo das linhas de rega.

Na horticultura de ar livre e nos pomares utilizavam-se mais os gotejadores e miniaspersores enquanto que na horticultura protegida começava-se a utilizar as mangas porosas.

Nos anos oitenta começaram a ser utilizados gotejadores autocompensantes que, teoricamente, num determinado intervalo de valores da pressão debitam sempre o mesmo caudal. Este tipo de gotejadores proporciona uma maior uniformidade de rega que se reflecte também na uniformidade de aplicação dos nutrientes através da água de rega (fertirregação).

Actualmente a maioria dos sistemas de rega gota a gota consistem em tubos de polietileno que trazem os gotejadores autocompensantes já inseridos, em que o trabalho de instalação é só o de estender os tubos, não se perdendo tempo a inserir os gotejadores nos tubos. Os agricultores podem ainda optar por tubos com os gotejadores mais ou menos espaçados, sendo os mais comuns de 0,75 m e de 1 m. Os fabricantes, através dos seus catálogos, fornecem informação sobre os maiores comprimentos desses tubos que é possível estender, sem reduzir a carga abaixo do valor mínimo que garante o efeito autocompensante dos gotejadores, de modo a facilitar a tarefa a quem não tem conhecimentos teóricos sobre escoamentos em pressão.

Mais recentemente, apareceu a inovação de, nesses sistemas, os gotejadores virem sem os orifícios descobertos. Através de um alicate apropriado pode-se destapá-los apenas quando se julgar conveniente. Trata-se de um sistema aconselhável para pomares novos instalados em solos de texturas ligeiras, pois durante os primeiros anos o sistema radical está pouco desenvolvido, pelo que se deverão evitar os desperdícios de água e de nutrientes que poderiam ocorrer com os gotejadores a funcionar em zonas ainda fora do alcance das raízes.

Na rega localizada os conceitos de capacidade de campo, coeficiente de emurchecimento e capacidade utilizável perdem importância, pois nas regas de alta frequência podem-se ajustar as dotações de rega às necessidades das plantas, diminuindo as perdas de água por evaporação e por percolação profunda (Hillel, 1990), facto de acrescida importância nos solos de texturas arenosas em que a alta frequência das regas é de grande importância para a obtenção de eficiências de rega satisfatórias.

Nos sistemas tradicionais de rega por alagamento ou aspersão, que implicavam deslocação dos equipamentos, as regas de alta frequências não eram rentáveis economicamente rentáveis, devido custos de aplicação são bastante mais elevados.

4.1 Características hidráulicas dos aplicadores

O escoamento dos aplicadores de água em rega localizada - gotejadores e miniaspersores - é descrito pela relação:

$$Q = kH^x \quad (4.1)$$

em que: Q é o débito dos aplicadores (L^3/T), H é a carga hidráulica (L), k é um factor de proporcionalidade característico do aplicador e x é o expoente que caracteriza o débito do aplicador em função do tipo de regime de escoamento.

Usualmente consideram-se três tipos de regime de escoamento, em função do valor de x dos aplicadores:

- laminar
- turbulento
- gotejadores autocompensantes

No regime laminar o valor de x será de 1; para o regime turbulento variará de 0,50 a 0,57 e para os aplicadores autocompensantes será igual a 0.

4.2 Gestão da rega gota a gota

Actualmente, como já foi referido, utilizam-se cada vez mais os gotejadores autocompensantes que garantem uma boa uniformidade de aplicação de água e de fertilizantes. Com os cada vez mais sofisticados e eficazes aparelhos programadores de regas fica também assegurada a boa gestão temporal sem que haja necessidade de manualmente se ligar e desligar os sistemas. Em resumo, desde a origem de água (geralmente equipada com estações de filtragem adequadas) até ao aplicador (gotejador) o sistema é praticamente perfeito. As deficiências na concepção destes sistemas surgem, por vezes, devido ao desconhecimento do processo do movimento da água no solo.

A boa gestão da rega é um elemento de primordial importância para diminuir as perdas por percolação profunda e a consequente lixiviação de nutrientes. Assim, as regas deverão ser conduzidas por forma a evitar que a água atinja profundidades abaixo das raízes,

diminuindo-se assim as perdas de água e de nutrientes. Quando se fertiliza por fertirrega o problema requer ainda maior atenção; a regagota a gota quando mal conduzida poderá originar acentuadas perdas de água, por percolação profunda, e de nutrientes, principalmente nos solos de textura arenosa. No caso do azoto, para além das perdas por lixiviação, podem ocorrer também elevadas perdas por desnitrificação, principalmente nos solos argilosos, se o teor de humidade do solo permanecer próximo da saturação durante muito tempo.

A grande maioria dos sistemas de regagota a gota são adquiridos “a sentimento”. Os gotejadores autocompensantes mais comercializados têm débitos da ordem dos 2 L/h, 4 L/h e 8 L/h, sendo os de 4 L/h os mais difundidos. Geralmente, não se realiza qualquer tipo de avaliação prévia sobre as propriedades hidráulicas do solo a regar, por mais simples que seja.

Como consequência, um mesmo tipo de sistema de rega (débitos dos gotejadores e espaçamentos) tanto é instalado em solos de texturas mais arenosas como nos de texturas mais argilosas, com todo o tipo de inconvenientes daí resultantes, nomeadamente perdas por percolação profunda, nos solos mais leves, ou encharcamento excessivo nos solos mais pesados que poderá provocar um insuficiente arejamento na zona radical, originando problemas fitossanitários, e também significativas perdas de azoto por desnitrificação.

O pequeno volume de solo humedecido, sob rega localizada, e as dimensões da largura e profundidade no volume humedecido são de considerável importância prática. O volume de solo representa a quantidade de água retida armazenada pelo que a dimensão da profundidade humedecida deve coincidir com a profundidade alcançada pelo sistema radical (Zur, 1996).

O conhecimento da forma do volume de solo humedecido pela água e pelos solutos e a sua distribuição nesse volume é de primordial importância para a concepção, operação e gestão dos sistemas de rega localizada com fertirrega (Khan *et al.*, 1996).

Para se obter o desejado volume a humedecer, é necessário escolher os adequados débitos dos gotejadores, assim como os seus espaçamentos, e também os seus tempos de funcionamento, de acordo com o que a seguir se descreve.

As relações entre os débitos dos gotejadores e as profundidades e diâmetros humedecidos, considerando também as propriedades hidráulicas dos solos e os volumes aplicados, têm sido estudadas, através de modelos matemáticos como os de Brandt *et al.* (1971) e de Warrick (1974) que prevêem que os débitos mais pequenos geram maiores profundidades e menores larguras humedecidas que as correspondentes a débitos superiores e também que aos maiores volumes aplicados correspondem também as maiores profundidades humedecidas. Estas relações têm sido referidas e confirmadas em trabalhos de

campo (Michelakis *et al.*, 1993; Zur, 1996; Khan *et al.*, 1996). Revol *et al.* (1995) testaram também quatro teorias (Wooding, 1968; Raats, 1971; Lockington, 1984; Philip, 1986) que permitem determinar o raio de solo humedecido em função do débito do gotejador e das propriedades hidráulicas do solo, tendo concluído que a de Raats (1971) era a que conduzia a resultados mais próximos dos obtidos em campo.

Zur (1996) refere um trabalho de Schwartzman e Zur (1986) no qual demonstraram que a razão “diâmetro/profundidade” do volume de solo humedecido varia inversamente com a condutividade hidráulica do solo. Esta razão também varia inversamente com a dotação aplicada, sendo mais este aspecto mais significativo nos solos arenosos. Um aumento do débito dos gotejadores traduz-se num aumento da referida razão, sendo mais evidente nos solos de texturas médias a pesadas.

Khan *et al.* (1996) realizaram trabalhos de campo nos quais observaram essas relações utilizando gotejadores de débitos de 1,5, 2,0 e 2,5 L/h e em que eram garantidos também três volumes de rega, 15, 20 e 25 L, por cada uma das três classes de débito. Concluíram também que o diâmetro humedecido depende da condutividade hidráulica saturada e do débito do gotejador e que, para um mesmo débito, num solo arenoso o diâmetro humedecido é menor que num solo argiloso. Observaram também que o débito utilizado tem influência na forma do volume humedecido; a maiores débitos correspondem maiores larguras humedecidas à superfície e menores profundidades, provavelmente devido às diferenças entre as dimensões das zonas saturadas pela entrada de água correspondentes a cada débito. Foi confirmado também que os maiores volumes aplicados reflectem-se em maiores profundidades, principalmente nas proximidades do ponto de aplicação.

Numa correcta gestão da regagota a gota deverão ser considerados parâmetros como a capacidade utilizável do solo e as necessidades hídricas máximas da cultura em causa de modo a estimar o volume de solo que deverá ser humedecido, contrariamente ao que sucede na prática, em que o volume de solo humedecido é consequência do tipo de sistema instalado. Deverão ser considerados também previamente o intervalo de rega pretendido e o déficit de armazenamento permitido entre duas regas.

Face a isto, Zur (1996) propõe um processo para escolha dos débitos de gotejadores que assegurarão o volume de solo humedecido que se pretende, com o diâmetro e a profundidade desejados, em função da condutividade hidráulica do solo, das necessidades hídricas no período de ponta e considerando um déficit de gestão entre duas regas previamente definido.

As considerações que abaixo se apresentam foram retiradas de Zur (1996).

Considerando que o volume de solo humedecido por uma fonte pontual poderá ser representado por uma expressão que representa um elipsóide truncado, poder-se-á calculá-lo através de:

$$V = \frac{\pi}{12} d^2 \left[2z + h - \frac{h^3}{(z-h)^2} \right] \quad (4.2)$$

em que d é a largura máxima que ocorre à profundidade h abaixo da superfície do solo e z é a extensão vertical desse volume.

Pode-se definir um “volume de solo humedecido com gestão controlada”, V_m , como o volume de solo que deverá ser humedecido para conservar a fracção do déficit de gestão permitido para que a água disponível no solos seja suficiente para responder ao pico de evapotranspiração entre duas regas consecutivas e que poderá ser calculado, para uma área de $1m^2$, através da expressão:

$$V_m = \frac{PDWU \ PII}{WHC \ MAD} \quad (4.3)$$

em que WHC é a capacidade utilizável (cm^3/cm^3), MAD é o déficit de gestão, $PDWU$ é a dotação máxima diária (mm), PII o intervalo de rega (dias) e V_m o volume a humedecer (L).

A máxima largura do volume de solo humedecido, será calculada através da expressão:

$$d = 1,32 z^{0,35} q^{0,33} k_s^{-0,33} \quad (4.4)$$

em que d é a máxima largura de solo humedecido, z é a profundidade humedecida, q o débito dos gotejadores e k_s a condutividade hidráulica saturada do solo. Os coeficientes utilizados resultaram de dados experimentais recolhidos em volumes de solos contidos em contentores.

Combinando as expressões (4.2) e (4.4) e assumindo que o expoente de z é 0,33 obtém-se uma equação que permite determinar o débito dos gotejadores que permite obter o “volume de solo humedecido com gestão controlada”.

$$q = \frac{k_s d 12 V_m}{2,3z\pi \left(2z + h - \frac{h^3}{(z-h)^2} \right)} \quad (4.5)$$

Assim, para se determinar o débito mais apropriado para garantir o volume, largura e profundidade de solo pretendidos, poder-se-á seguir os seguintes passos:

- estimar V_m a partir da expressão (4.3)
- seleccionar as desejadas combinações de d e de z para o V_m seleccionado, a partir da equação (4.2) ou da figura (4.1) obtida através da resolução da equação (4.2).
- calcular o débito pretendido, a partir da K_s e dos valores seleccionados, ou calculados, de d e z .

Na figura 4.1 apresenta-se as curvas de z em função de V_m e de z , resultantes da resolução da expressão (4.2).

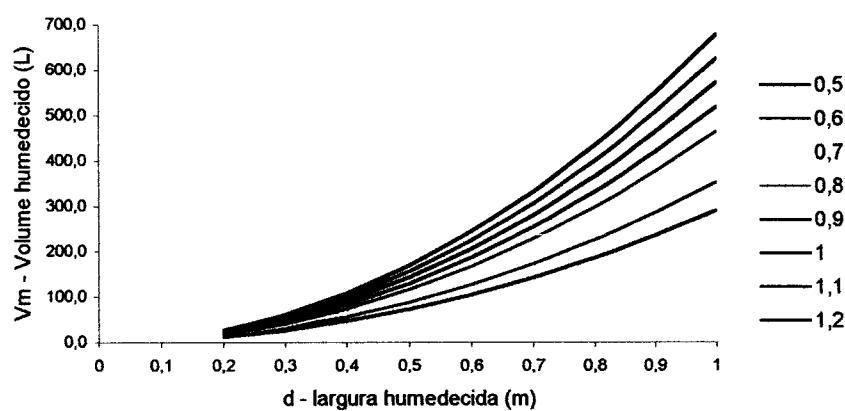


Figura 4.1 Volume de solo humedecido (V_m) correspondente a diferentes combinações de larguras d e profundidades z . (Adaptado de Zur, 1996)

Estas considerações têm particular interesse para o controlo da profundidade humedecida de modo a diminuir as perdas por percolação e as prováveis lixiviações de nutrientes.

As baixas eficiências de sistemas de rega localizada poderão ser resultantes da existência de macroporos e do efeito de by-pass na zona das raízes das culturas.

No entanto, existe alguma contradição na literatura sobre as relações entre o débito dos gotejadores e a distribuição das componentes horizontal e vertical da infiltração.

Segundo Bar-Yosef e Sheikholeslami (1976) os modelos de Brandt *et al.* (1971) e de Warrick (1974) não consideram a redistribuição que ocorre depois de terminada a rega, em que se verifica mais algum movimento vertical e também horizontal. Bar-Yosef e Sheikholeslami (1976), num estudo realizado em solos arenosos, sujeitando o solo a dois débitos diferentes, 0,25 L/h e a 2,5 L/h, mas de forma a garantir o mesmo volume aplicado, concluíram que foi na situação de débito maior que se registaram as maiores profundidades humedecidas, contrariamente aos resultados obtidos através dos modelos de Brandt *et al.* (1971) e de Warrick (1974).

Jury e Earl (1977), num solo nu, de textura franca, com condutividade hidráulica saturada da ordem dos 0,010 m/h, sujeito a regas por gotejadores de débito de cerca de 4 L/h, compararam duas situações em que se garantiram iguais volumes de rega mas com diferentes distribuições. Numa regou-se diariamente (com a dotação repartida por três regas) e na outra a mesma dotação total foi aplicada num único dia da semana. Concluíram que as regas semanais resultaram em maiores volumes de água transferidos lateralmente que nas regas diárias. Observaram também que a área inundada à superfície do solo era também maior nas regas semanais.

Earl e Jury (1977), nas mesmas condições da citação anterior, mas com o solo revestido por uma cultura de abóbora, regada através das referidas duas diferentes modalidades, observaram que, contrariamente ao referido pela maioria da literatura existente, com regas semanais se atingiam maiores produções que com regas diárias, devidas a um maior volume radical que se desenvolveu na situação da rega semanal. Observaram também que as perdas por evaporação registadas na modalidade de rega semanal foram inferiores em 40 % relativamente às registadas com regas diárias.

Levin *et al.* (1979) estudaram também a aplicação de água através de gotejadores de diferentes débitos e de aplicação intermitente, por "pulsos". Testaram também uma adaptação do modelo matemático de Bresler (1975), comparando os respectivos resultados com os obtidos em laboratório e no campo.

O trabalho de campo realizou-se num solo de textura arenosa (97,9 % de areia e 1,3 % de argila), com condutividade hidráulica saturada de cerca de 0,45 m/h. No campo experimental, aplicaram um mesmo volume de 12 litros através de gotejadores de débitos de

1, 2, 4 e 8 L/h. Com os gotejadores de 2 L/h, estabeleceram duas modalidades: uma com rega contínua e a outra através de pulsos de 30 minutos. Observaram assim que os maiores diâmetros humedecidos correspondiam aos gotejadores de maiores débitos e que a rega contínua com gotejadores de 1 L/h originava diâmetros humedecidos idênticos aos resultantes na modalidade dos gotejadores de 2 L/h por rega intermitente, com pulsos de 30 minutos. Contudo a redistribuição poderá atenuar estas diferenças, segundo os mesmos autores. No entanto, nas situações de regas de alta frequência o consumo pelas plantas poderá reduzir o efeito da redistribuição. No tocante à profundidade humedecida, os gotejadores de 1 L/h e os de 2 L/h por rega intermitente provocavam retenção de maiores quantidades de água nos primeiros 0,60 m que os de 2, 4 e 8 L/h por rega contínua, sendo muito pequenas as diferenças entre estes. Tal significa, que para evitar perdas por percolação, a utilização de gotejadores de débitos de 1 L/h poderá reduzir as perdas água e de nutrientes, por percolação profunda e lixiviação. Porém, no mercado não existem gotejadores de 1 L/h, o que inviabilizará esta solução, pelo que a melhor solução, em solos bastante arenosos, é a utilização intermitente de gotejadores de débitos elevados.

Os mesmos autores referem a importância da quantificação da distribuição da água no solo, na rega localizada, considerando que a simples observação da evolução da frente de humedecimento é insuficiente para caracterizar o processo.

Lafolie *et al.* (1989b), estudaram o movimento da água numa situação de rega gota a gota num solo de textura fina, com 29% de argila, 60% de limo e 11% de areia, testando simultaneamente um modelo de diferenças finitas proposto por Lafolie *et al.* (1989a).

Nos trabalhos foram utilizados gotejadores de débito 4 L/h que funcionavam durante quatro horas, seguindo-se 20 horas para a redistribuição.

Verificaram que havia formação de crosta que se reflectia no aumento da área saturada após cada ciclo de rega, situação também descrita por Jury e Earl (1977) no trabalho descrito anteriormente, numa situação de solo arenoso-franco.

Os diversos modelos não respondem, no entanto, a situações de fendas nos solos, poros abertos por seres vivos, como a pequena fauna do solo, e outros caminhos preferenciais para os fluxos que podem subverter a distribuição uniforme da água e resultar em algumas baixas eficiências na rega localizada (Clothier *et al.*, 1985).

5. FERTIRREGA EM SISTEMAS DE REGA LOCALIZADA

Cada vez se acentua mais a prática da fertirrega através de modernos sistemas de rega localizada automatizados, em que programadores de rega de diversos graus de sofisticação asseguram uma boa gestão da fertirrega, a nível das quantidades de água e fertilizantes aplicadas no solo.

As principais vantagens da aplicação fertilizantes através de rega localizada a facilidade de fornecimento das quantidades e das concentrações, a maior precisão na aplicação das adequadas concentrações dos nutrientes na camadas humedecidas da zona radicular, a redução dos custos de aplicação, a não perturbação pelo vento (Rolston *et al.* 1979; Bar-Yosef, 1999). Na rega localizada aplicada em alta frequência (intervalos iguais ou inferiores a 2 dias) as variações das quantidades de nutrientes ao dispor das culturas são menores (Bar-Yosef, 1999). Os nutrientes aplicados na própria água da rega são absorvidos pelas plantas mais facilmente e as plantas absorvem também a água mais facilmente devido aos nutrientes, num processo sinérgico (Ferrer-Tálon, 1994).

5.1 Formas de aplicação de fertilizantes na água de rega

A aplicação de fertilizantes na água de rega, na rega localizada, realiza-se através de bombas auxiliares que a partir de tanques despressurizados injectam a solução na água de rega. As bombas mais utilizadas são as que funcionam através de energia hidráulica ou de energia eléctrica.

As bombas hidráulicas usam a própria energia da água da rede para mover os seus mecanismos. Injectam a solução fertilizante na água de rega através dos impulsos do seu êmbolo, sendo a taxa de injeção dos fertilizantes função da pressão da água na linha de abastecimento (Oliveira, 1993).

As bombas eléctricas são mais precisas, e podem ser reguladas para uma gama de taxas de injecção, independentemente da pressão da água o que dota o sistema de uma maior versatilidade. Tratam-se de bombas concebidas especialmente para essa função, geralmente de pistão ou diafragma accionadas por motores eléctricos.

5.2. O azoto na fertirrega localizada

Diversos estudos mostram também que a resposta das culturas à aplicação de N por fertirrega através de sistemas de rega localizada é superior às situações em que a rega é localizada mas a aplicação do N é em banda (Bar-Yosef, 1999). Em trabalhos realizados em Israel, com laranjeiras ((Dasberg *et al.*, 1988, citados por Bar-Yosef, 1999), e na Florida, com toranjeiras (Bouman, 1996, citados por Bar-Yosef, 1999), a aplicação de N por fertirrega foi mais eficiente que a aplicação de N em banda.

Na regagota-a-gota, o azoto move-se imediatamente na água de rega proveniente dos gotejadores (Rolston *et al.*, 1979). A aplicação localizada dos nutrientes, no interior do volume de solo humedecido, na zona activa das raízes, aumenta a eficiência do uso de nutrientes. Rolston *et al.* (1979) referem um trabalho experimental realizado por Phene e Beale (1976), no qual compararam as concentrações de nitratos no solo, resultantes da aplicação de azoto através de regagota-a-gota, rega por aspersão e rega de superfície, em milho doce, tendo concluído que no caso da regagota-a-gota as concentrações de nitratos eram mais elevadas na zona radical, conduzindo a melhores resultados.

Rolston *et al.* (1979) citam também trabalhos realizados por Miller *et al.* (1976), com tomateiros, em que se compararam a eficiência de aplicação de azoto através de sistemas de regagota-a-gota com outras formas de aplicação de fertilizante, em que concluíram que a eficiência da aplicação de N era maior quando aplicada através dos próprios sistemas de regagota-a-gota do que quando aplicado em banda, tanto quando submetido a rega por sulcos como por regagota-a-gota. Concluiu-se também nestas experiências que a localização dos gotejadores, em relação à localização das raízes, era também um aspecto muito importante, por ter influência na direcção do escoamento da água e consequentemente na disponibilidade do azoto do solo. Keng *et al.* (1979) em trabalhos realizados com pepino, obtiveram maiores produções com a fertilização a ser realizada por fertirrega, através de regagota-a-gota, do que por aplicações em banda ou por espalhamento no solo, também com regagota-a-gota. As maiores concentrações de N foram encontradas à profundidade de 0,50 m, devido à

menor actividade radical.

A exemplo do que acontece com os outros tipos de fertilizações, também nas fertirregas localizadas se devem fraccionar as quantidades de N a aplicar pois independentemente da fonte do N aplicado no solo, ele acabará por se transformar em nitratos e ficará disponível para ser movimentado através da água de rega pelo que não se recomenda, assim, que o N seja aplicado de uma única vez, preconizando-se múltiplas aplicações. Rolston (1979), cita experiências realizadas por Phene *et al.* (1978), nas quais demonstraram que as aplicações de N com elevada frequência através de regagota-a-gota, numa cultura de batateira, eram duas vezes mais eficientes que as aplicações convencionais de fertilizante com regagota-a-gota.

Bar-Yosef e Sheikholeslami (1976), através de experiência realizadas em condições controladas de laboratório, concluíram que quando se aplica azoto sob a forma nítrica na água de rega, e após algumas fertirregas, verifica-se que as maiores concentrações de nitratos na solução do solo, como sucede com as dos sais, encontram-se na periferia dos “bolbos humedecidos”, tanto à superfície como em profundidade, o que foi também observado por Keng *et al.* (1979). Os mesmos autores observaram que nos solos argilosos os teores de nitratos na água de rega eram bastante superiores aos da solução do solo, atribuindo a diferença ao eventual processo de desnitrificação que ocorre com alguma intensidade neste tipo de solos, enquanto que em solos arenosos não se observaram tais diferenças, por neste tipo de solos não ocorrer, praticamente, a desnitrificação. Verificaram também que na camada superficial dos solos argilosos havia maiores concentrações de nitratos, devido aos movimentos ascendentes.

A distribuição espacial do N é fortemente afectada pela fonte do N via água de rega. O amónio é adsorvido pelos colóides e óxidos metálicos do solo e tem uma mobilidade restrita comparada com a do ião não reactivo NO_3^- . Isto significa que a nitrificação deve ser considerada quando se avalia o transporte de N e a sua distribuição no solo (Bar-Yosef, 1999).

A concentração do ião amónio, quando aplicado através de regagota-a-gota, é maior imediatamente abaixo dos gotejadores. Os iões mover-se-ão para maiores profundidades à medida que a concentração do amónio aumenta o suficiente para dominar a capacidade de troca catiónica do solo (Rolston *et al.*, 1979), estando a profundidade a atingir dependente da taxa de aplicação de amónio e da capacidade de troca catiónica do solo, pelo que a maiores concentrações, estarão associadas maiores profundidades atingidas. A maior parte do amónio é transformada biologicamente em nitratos no espaço de duas a três semanas se a

temperatura do solo variar entre 25 e 30°C. No entanto, se o teor de humidade for muito elevado, principalmente por baixo dos gotejadores, essa transformação será mais lenta porque o processo necessita de oxigénio, e assim as quantidades formadas de NO_3^- serão menores.

Para se obter uma rápida e uniforme distribuição de N no volume do solo devem-se utilizar fertilizantes com o N sob a forma nítrica ou de ureia. A ureia é hidrolizada no espaço de 2-3 dias a 25°C (Black, 1968, citado por Bar-Yosef, 1999), enquanto que o NH_4^+ tem a sua mobilidade reduzida até à nitrificação estar concluída. A ureia é relativamente solúvel na água de rega e não é fortemente retida no solo e assim atinge maiores profundidades que os sais de amónio. Apresenta também a vantagem das suas concentrações à superfície do solo serem baixas o que diminuirá as perdas de azoto por volatilização da amónia.

Quando se aplica ureia na água de rega através de gotejadores, regista-se uma rápida amonificação na zona humedecida pelo gotejador, resultante da hidrólise da ureia. Neste processo há um aumento do pH causado pelas duas moles de OH^- resultantes da cada mole de ureia hidrolizada (Clothier e Sauer, 1988). Quando se dá a nitrificação, há uma acentuada redução do pH, devida à oxidação do NH_4^+ em NO_3^- pelo que ao pico do pH que tinha sido atingido por via da hidrólise da ureia segue-se uma drástica redução no pH (Clothier e Sauer, 1988). Há a referir também que o azoto aplicado através da água de rega e o existente no solo se transformam consoante o teor de humidade do solo. Quando existem teores elevados de humidade a forma predominante é o NH_4^+ resultante de uma mais acentuada amonificação, enquanto que quando o solo seca, e aumenta o teor de oxigénio, as quantidades de NO_3^- aumentam podendo seguir-se alguma desnitrificação se houver matéria orgânica com os necessários microrganismos.

A desnitrificação pode causar perdas de nitratos, na fertirregação, particularmente após a rega, quando o teor de humidade do solo se aproxima da saturação e existe suficiente quantidade de carbono solúvel e o oxigénio é escasso. No entanto, como as estimativas da desnitrificação em situações de rega têm conduzido a valores baixos, menos de 5 a 10% do valor de N aplicado (Legg e Meisinger, 1982; Bar-Yosef, 1999) esta perda de N é muitas vezes desprezada nas considerações sobre a fertirregação.

5.3 Gestão da fertirregação

Apesar de todas as grandes vantagens apontadas para a fertirregação, convém referir que na aplicação de fertilizantes nítricos ou nitro-amoniacais os teores em nitratos das águas de rega poderão ser, à partida, bastante elevados e ultrapassar largamente os valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde (50 mg/L), para águas potáveis, pelo que se houver um fluxo intenso destes solutos para os aquíferos poderá aumentar o risco de contaminação dos aquíferos.

A concentração de nitratos prevista na água de rega pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$[NO_3^-] = \frac{N_r T}{0,2258 D_r} \quad (5.1)$$

em que $[NO_3^-]$ é a concentração média de nitratos na água de rega, N_r é a quantidade de azoto aplicada através da água de rega, T é o teor de N-NO₃⁻ no N total do fertilizante em causa e D_r é a dotação de rega.

Durante a fertirregação os valores serão superiores porque é aconselhável que o tempo de fertirregação seja inferior ao tempo de rega.

5.4 Adubos azotados mais utilizados em fertirregação

Nitrato de amónio

Doseia normalmente cerca de 33,5% de N, sendo 50% sob a forma de nítrica e 50% sob a forma amoniacial. Tem solubilidade de cerca de 1600g/L a 20°. É pouco salinizante e provoca diminuição no pH da água. No quadro 5.1 apresentam-se os valores de pH e da condutividade eléctrica (CE) esperados quando diluído em água destilada, segundo diferentes concentrações do fertilizante:

Quadro 5.1
Características do nitrato de amónio

Concentração (g/L)	pH	CE (dS/m)
0,25	5,63	0,49
0,5	5,59	0,78
1,0	5,56	1,49
2,0	5,38	2,78
3,0	5,34	4,56

Sulfato de amónio

Contém cerca de 20,5% de azoto. Tem solubilidade de cerca de 730g/L a 20°C. É acidificante e muito salinizante. Contém também enxofre. Quando diluído em água destilada, podem-se esperar os seguintes valores:

Quadro 5.2
Características do sulfato de amónio

Concentração (g/L)	pH	CE (dS/m)
0,25	5,47	0,54
0,5	5,49	1,04
1,0	5,49	2,14
2,0	5,49	3,45
3,0	5,53	5,04

Ureia

Doseia cerca de 46% de N. Tem solubilidade elevada, de cerca de 1000g/L a 20°. Não contribui para o aumento da condutividade eléctrica da água, pelo que pode ter interesse quando se utilizam águas salinas. Não é acidificante.

Quadro 5.3
Características da ureia

Concentração (g/L)	pH	CE (dS/m)
0,25	5,63	Menor que 0,01
0,5	5,70	Menor que 0,01
1,0	5,84	Menor que 0,01
2,0	6,10	Menor que 0,01

Solução N32

Trata-se de um adubo líquido que doseia cerca de 32% de N, estando 16% sob a forma de ureia, 8% sob a forma amoniacal e também 8% sob a forma nítrica. É de reacção neutra a ligeiramente alcalina, sendo pouco salinizante.

Quadro 5.4
Características da solução N32

Concentração (g/L)	pH	CE (dS/m)
0,25	6,11	0,32
0,5	6,62	0,58
1,0	7,12	1,10
2,0	7,23	2,29
3,0	7,37	3,33

Nitrato de potássio

Trata-se de um adubo que doseia cerca de 13% de N e 46% de K₂O, utilizado principalmente para garantir a fertilização potássica. É medianamente salino, e com reacção neutra a concentrações baixas, sendo pouco alcalinizante a doses mais elevadas.

Quadro 5.5
Características do nitrato de potássio

Concentração (g/L)	PH	CE (dS/m)
0,25	6,5	0,34
0,5	6,6	0,64
1,0	7,0	1,27
2,0	7,5	2,44

6. A REGA GOTA-A-GOTA E A FERTIRREGA AZOTADA DOS CITRINOS

Por ser a cultura de regadio predominante na região, ocupando uma área actual de cerca de 18000 ha, e sobre a qual incide este trabalho, interessará tecer algumas breves considerações sobre as características dos citrinos e também sobre as respectivas práticas de rega e de fertilização mais recomendadas.

O desenvolvimento das plantas, a utilização da água, a produtividade, a absorção de N, estão fortemente interligados, juntamente com a taxa de aplicação do N, as quais determinarão as perdas de N por lixiviação (Syvertsen e Smith, 1996).

Os citrinos têm um sistema radical fibroso, relativamente superficial, bem ramificado, com raízes laterais lenhosas e finas raízes fibrosas (Alva e Paramasivam, 1998), sendo renovado de dois em dois anos, (Feng *et al.*, 1990, citados por Dou *et al.* 1997).

A maior parte das raízes estão nos primeiros 0,30 m de profundidade e são as responsáveis pela maior parte da absorção da água e dos nutrientes, decrescendo substancialmente abaixo dos 1,20 m de profundidade (Castle, 1980; Zhang *et al.*, 1996, citados por Alva e Paramasivam, 1998). Até aos 0,90 m, nas árvores adultas, encontram-se ainda um elevado número de raízes activas (Shalhev et *al.*, 1976, citados por Moresher *et al.* 1983) e crê-se que não é necessária a aplicação da água a maiores profundidades (Huberty e Richards, 1954, citados por Moresher *et al.* 1983), devendo por isso o tempo de aplicação da rega ser definido de modo a que não ultrapassem os 0,90 m para evitar que haja perdas por percolação profunda e lixiviação de nutrientes (Alva e Paramasivam, 1998). No entanto, com regagota-a-gota poderá haver um maior aprofundamento do sistema radical que nas regas tradicionais por inundação, podendo contribuir para uma utilização mais eficiente da água (Swietlik, 1992).

Para estudos de lixiviação de N em pomares de citrinos adultos, segundo Alva e Paramasivam (1998), a monitorização do teor de nitratos da solução do solo à profundidade de 2,40 m dará uma ideia segura se haverá lixiviação.

Os citrinos são sensíveis ao encharcamento dos solo, podendo apresentar sintomas de estresse hídrico em situações de excesso de água no solo. Baixos teores de oxigénio no solo podem impedir a absorção de água após somente 4 dias de inundação (Syvertsen, 1996) e podem sentir dificuldades na absorção de nutrientes após 3 semanas de inundação (Syvertsen, 1996).

6.1 A regagota a gota de citrinos

6.1.1 Necessidades hídricas

O cálculo das necessidades e a oportunidade de rega tem sido estudado com algum desenvolvimento para o caso particular dos citrinos.

Para o cálculo da evapotranspiração existem diversos métodos, tais como o de Penman, Montheiss, Radiação, etc. Atendendo às dificuldades na obtenção de alguns dos parâmetros exigidos por esses métodos, o recurso à tina de evaporação de classe A é um processo simples e de uso bastante generalizado (Bielorai, 1982; Castel e Buj, 1990; Hillel, 1990; Swietlik, 1992). O cálculo da evapotranspiração cultural ET_c pode ser realizado através da expressão:

$$ET_c = Evap \ Kt \ Kc \ f(S) \quad (6.1)$$

em que $Evap$ é a evaporação registada na tina, Kt é um coeficiente associado ao meio em que está inserida a tina (velocidade do vento, humidade relativa, culturas envolventes), Kc é o coeficiente cultural, cerca de 0,6 ao longo do ciclo cultural Castel e Buj (1990), e $f(S)$ é uma função que relaciona a área actualmente ocupada pelas plantas com a área que está ao seu dispor.

Gimenez-Montesinos (1997) propôs uma metodologia de cálculo considerando a área da projecção da copa e o compasso de plantaçāo que a seguir se apresenta.

Assim, começa-se por determinar a percentagem de área coberta através da expressão:

$$Ps = \frac{D^2}{L l} \quad (6.2)$$

em que D é o diâmetro da copa, L a distância na entrelinha e l a distância na linha.

Determina-se depois a fracção N_a correspondente à superfície sombreada, através da expressão:

$$Na = \frac{1.3Ps + 9,69}{100} \quad (6.3)$$

A dotação líquida diária, D_l , é calculada através da expressão:

$$D_l = \frac{(Et Kp) Kc}{(Ea Cu)} \quad (6.4)$$

em que Et é o valor da evaporação medido na tina, Kp o coeficiente da tina, Kc o coeficiente cultural (0,4 para árvores jovens), Ea a eficiência de aplicação e Cu o coeficiente de uniformidade dos gotejadores.

Considerando-se a necessidade de uma fracção de lavagem, L_f , em função da condutividade eléctrica da água de rega, que exprime o seu teor em sais, utiliza-se a seguinte expressão:

$$L_f = \frac{1}{1 - \frac{CE_w}{2CE_e}} \quad (6.5)$$

em que CE_w é o valor da condutividade eléctrica da água de rega e CE_e é a condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo para o qual a produção esperada é nula, o qual no caso da laranjeira é de 8 dS/m (Ayers e Westcot, 1985).

Calculando-se as necessidades totais diárias D_t pela expressão:

$$D_t = I_l L_f \quad (6.6)$$

A gestão da rega pode também ser complementada também a partir da monitorização do teor de humidade do solo - recorrendo a sondas de neutrões, TDR e a sondas capacitivas (Fares e Alva, 2000) - ou através da monitorização da tensão de humidade do solo através da utilização de tensiómetros.

A condução da rega em função das leituras de 20 kPa em tensiómetros instalados a 0,30 m de profundidade parece ser um satisfatório método de gestão da rega de citrinos (Swietlik, 1992).

Nos sistemas de regagota a gota, principalmente depois de estarem instalados todos os gotejadores, há o inconveniente de as maiores dotações de rega estarem associadas a um maior tempo de funcionamento dos gotejadores o que poderá reflectir-se no humedecimento de camadas do solo abaixo das raízes, como é referido por Michelakis *et al.* (1993) que num trabalho realizado com abacateiros regados através de um sistema de regagota-a-gota, com os gotejadores de débito de 4 L/h, espaçados de 0,70 m, num solo de textura franca, observaram perdas por percolação profunda na modalidade correspondente às maiores dotações de rega, cerca de 90% da evapotranspiração cultural.

Associado às perdas de água estarão também as do NO_3^- que ao atingir uma profundidade abaixo da zona do enraizamento não poderá ser consumido nem rapidamente desnitrificado ou imobilizado pelos microrganismos, devido à limitada população destes (Yeomans *et al.*, 1992, citados por Alva e Paramasivam 1998) e pela falta de C disponível para os microrganismos (Carlisle *et al.*, 1989, citados por Alva e Paramasivam 1998), podendo ser lixiviado.

6.1.2 Superfície a humedecer na rega localizada dos citrinos

Neste método de rega coloca-se a questão sobre o volume de solo a humedecer. Um mesmo volume de solo pode ser humedecido através de uma maior superfície humedecida e menor profundidade humedecida ou de menor superfície humedecida mas com maior profundidade humedecida. Numa situação de menor profundidade humedecida, segundo Mantel (1977), citado por Moresher *et al.* (1983), será conveniente que no início da época das regas toda a profundidade da zona das raízes esteja à capacidade de campo para a rega ter sucesso. A opção alternativa, diminuir a superfície humedecida, pode resultar devido à diminuição da superfície evaporação sujeita à evaporação.

Comparada com a rega por aspersão, a regagota-a-gota apresenta a vantagem de ter uma menor superfície humedecida o que permite diminuir as perdas por evaporação (Bielorai, 1982). Por outro lado, as contínuas e frequentes regas, concentradas num limitado volume de solo incrementam as perdas por percolação profunda (Bielorai, 1982).

Bielorai (1982) realizou um estudo, com toranjeiras enxertadas sobre laranjeira azeda, no qual comparou a eficiência da rega de diferentes sistemas de rega em três situações de não total humedecimento da superfície de um solo de textura franco-arenosa: gota-a-gota com uma simples linha de gotejadores (30% de área humedecida), gota-a-gota com dupla linha de gotejadores (40% de área humedecida) e rega por aspersão (70% de área humedecida). O estudo comportou nove tratamentos: aplicação de duas dotações de rega (80% e 100% das necessidades estimadas) para os três graus de humedecimento, com intervalos de rega de 3 dias na rega gota-a-gota e de 14 para a aspersão, nas situações em que se aplicavam 80% e 100% da água de rega, e a mesma dotação de rega de 100% das necessidades com um intervalo de rega de 7 dias para a rega gota-a-gota e de 21 para a aspersão. Nas situações de menor cobertura de solo houve maior consumo de água nas zonas não regadas do que nas zonas não regadas das modalidades com maior cobertura de solo. Verificou-se que houve maiores perdas por percolação profunda nas áreas na rega gota-a-gota, maiores na situação da linha simples com dotação de 100% e maiores perdas por evaporação (13% do total de água aplicada) na situação da rega por aspersão de 100% de aplicação com 7 dias de intervalo. As maiores produções foram atingidas na rega gota-a-gota com dupla linha, com dotações de rega de 100% tanto com intervalo de rega de 3 como de 7 dias, assim como os melhores rácios de massa de fruto produzido por volume de água consumida.

Para além das quantidades de água a fornecer através da rega, convém não menosprezar as quantidades provenientes da precipitação. Bielorai (1982) refere que na zona do estudo, Israel com clima semi-árido semelhante ao do Algarve, a água retida no solo resultante da precipitação que ocorre no período de Novembro a Março poderá ser utilizada pelas plantas até Maio.

Swietlik (1992) refere também que raízes não se concentram apenas na zona dos gotejadores, o que acontecerá somente no 1º ano, mas também nas outras zonas, em que as raízes absorvem as águas provenientes da precipitação, acentuando-se o processo à medida que as plantas vão desenvolvendo o seu sistema radical. Ainda segundo Swietlik (1992), a maior concentração de raízes pode não ocorrer por baixo dos gotejadores, devido a condições não muito favoráveis, como deficiente arejamento, ou por nas outras zonas poder haver ainda humidade suficiente, embora nos climas áridos seja nítido que a maior concentração é por baixo dos gotejadores.

6.2 A fertirrega azotada dos citrinos com rega localizada

A fertilização dos citrinos realiza-se de acordo com os objectivos em causa. Assim, a fertilização de jovens plantas de citrinos tem o objectivo de favorecer o crescimento rápido o qual é função do crescimento das raízes e da parte aérea, enquanto que nas árvores adultas o objectivo é gerar o mínimo crescimento vegetativo e aumentar a máxima produção de fruta de qualidade (Dou *et al.*, 1997).

Nas nossas condições, os citrinos têm três períodos de formação das folhas: no início ou meados de Fevereiro, fins de Maio ou princípios de Junho e em Setembro ou no início de Outubro (Amaral, 1994).

A maior absorção de N ocorre durante a formação do fruto, sendo a absorção durante o período de inverno muito baixa.

Para plantas adultas, crê-se que uma dotação anual de 200 Kg/ha de N serão suficientes para assegurar uma boa produção de fruta e um bom desenvolvimento vegetativo (Dasberg, 1987). Metade desse valor será, em princípio, removido pelos frutos, cerca da décima parte será acumulada nas árvores e o resto perder-se-á por lixiviação ou por desnitrificação ou volatilização da amónia (Dasberg, 1987). A tendência é até para cada vez mais se diminuírem as quantidades a aplicar, devido ao aumento da eficiência conseguida através da utilização de modernas tecnologias de fertirrega.

É recomendado que as fertilizações se realizem em função dos resultados de análises foliares, de folhas de ramos não frutíferos, colhidas no início do outono e folhas essas que resultaram da rebentação da primavera anterior, aceitando-se que de acordo com a classificação de Embleton *et al.* (1973), para pomares de citrinos da Califórnia, os níveis óptimos do N na matéria seca das folhas deverão variar entre os 2,4 e os 2,6%.

As quantidades de N a utilizar na fertilização de citrinos estarão dependentes da sua eficiência de utilização. Existem diversas referências à utilização do N pelos citrinos. Assim, segundo Bingham *et al.* (1971), citados por Al-Jamal *et al.* (1997), os citrinos absorvem menos de 50% de N em solos franco-arenosos. Dasberg (1987), citado por Dou *et al.* (1997), aponta uma eficiência de utilização de azoto para árvores de fruto entre 20 e 40%, enquanto que Obreza (1996) refere que pomares de alto rendimento podem ter eficiências de N na ordem dos 50%.

As plantas de citrinos absorvem cerca de 0,5 ppm de N-NO₃⁻ por dia, segundo Chapman e Parker (1942) e Huffaker e Rains (1978), citados por Bacon e Davey (1982).

Trabalhos realizados com laranjeiras e toranjeiras em Israel (Dasberg *et al.*, 1988,

citado por Bar-Yosef, 1999) e na Florida (Ferguson e Davies, 1989, citados por Willis *et al.*, 1991; (Boman, 1996, citado por Bar-Yosef, 1999) demonstraram que a produção é mais elevada e eficiência da utilização de N é maior com fertirrega do que com aplicações em cobertura, provavelmente devido a que as frequentes fertirregas com N durante a maior parte do ciclo vegetativo estimulam o crescimento vegetativo por existirem sempre elevadas quantidades de N disponíveis para serem assimiladas (Swietlik, 1992).

A eficiência da aplicação do N por fertirrega tem sido estudada com algum detalhe na Florida, embora praticamente sempre em sistemas de rega por miniaspersão que será a variante da rega localizada mais generalizada nessa região.

Willis *et al.* (1991) descrevem um trabalho, realizado com laranjeiras Hamlin, enxertadas sobre laranjeira azeda, com um ano de instalação no campo, no qual compararam a aplicação da aplicação de fertilizantes sólidos com a aplicação através da água de rega. O trabalho constou de 3 experiências. Na primeira aplicaram-se 230 gramas de N por planta, sendo o fertilizante sólido fracionado em 5 aplicações no ano, de 6 em 6 semanas, enquanto que o fertilizante líquido foi aplicado em 3 modalidades diferentes: 5, 10 e 30 vezes no ano. Na segunda experiência, bastante semelhante à anterior, em que se aplicou a mesma quantidade de N por planta, houve 2 modalidades de utilização do fertilizante sólido, 3 e 5 vezes por ano, e 4 modalidades de aplicação dos fertilizantes através da água de rega, 3, 5 10 e 30 vezes por ano. Na terceira experiência houve dois níveis de N por planta, 60 e 110 gramas, e em cada um deles houve 4 modalidades de frequências de aplicação: fertilizante sólido aplicado 5 vezes por ano e fertilizante líquido aplicado 5, 10 e 30 vezes por ano. No trabalho mediram-se os diâmetros dos troncos e realizaram-se medições a nível do desenvolvimento vegetativo. Não encontraram diferenças significativas entre os diversos tratamentos das duas primeiras experiências, enquanto que na terceira se registaram diferenças significativas entre o nível de 60 e o de 110 gramas de N por planta, sendo o desenvolvimento vegetativo bastante menor no nível de 60 gramas. Determinaram também as quantidades de N-NO₃⁻ e de N-NH₄⁺ presentes no solo, em mg/Kg de solo, tendo observado que nas modalidades de fertirrega os teores de N-NO₃⁻ e de N-NH₄⁺ no solo eram bastante superiores aos registados nas outras modalidades nos primeiros 0,15 m de profundidade, não havendo diferenças significativas a maiores profundidades.

Syvertsen e Smith (1996) descrevem um trabalho realizado com toranjeiras de quatro anos, enxertadas em dois porta-enxertos diferentes, limoeiro volkameriana e laranjeira azeda, colocadas em lisímetros de 7.9 m³ de volume, em que se aplicaram 3 níveis de fertilização de N, durante dois anos e meio. Os 3 níveis de fertilização, por fertirrega, foram de 79, 180 e

543 gramas por planta, por ano, quando as toranjeiras tinham 5 anos e de 126, 455 e 868 gramas por planta, por ano, quando tinham 6 anos. As doses recomendadas na Florida para esta situação são de cerca de 558 gramas de N por planta, para uma densidade de 321 plantas por hectare. Determinaram a produção atingida, estimaram a taxa de absorção do fertilizante e calcularam a lixiviação. A rega foi conduzida em função da evaporação registada numa tina de classe A, em que as dotações de rega correspondiam a 0,6 do valor medido na tina, sendo a rega cuidadosamente gerida para não haver perdas de água que eram controladas pelo seu aparecimento ou não nos drenos do lisímetro. A rega realizou-se através de miniaaspersores de débito de 60 L/h. As quantidades lixiviadas de N lixiviado foram de cerca de 2 a 9% das quantidades aplicadas nas toranjeiras enxertadas sobre o limoeiro volkameriana, excepto para o nível mais baixo no qual se registou cerca de 42%, correspondendo a uma concentração média de N na água de cerca de 6,7 mg/L, sendo no nível mais elevado de cerca de 7% quando as plantas tinha 5 anos e de 9% quando as plantas tinham 6 anos, com uma concentração média de N na água de cerca de 18,6 mg/L. Nas plantas enxertadas em laranjeira azeda houve menos eficiência na absorção do N, reflectindo-se em maiores quantidades de N lixiviado, sendo de 11 e 32 %, com concentrações de N na água de 0,8 e 4,1 mg/L, no nível mais baixo no quinto e sexto ano, de 13 e de 9%, no nível intermédio, no quinto e sexto ano, com concentrações de 2,7 e 6,6 mg/L, e de 27 e 30%, com concentrações de 21,6 e 40,3 mg/L, no nível mais elevado, no quinto e sexto ano. Os desenvolvimentos vegetativos foram superiores nas plantas enxertadas sobre o limoeiro volkameriana, revelando uma maior aptidão deste para a absorção do N. Os autores concluíram que teria que existir um maior controlo nas regas e das fertilizações e que em solos de textura arenosa, como o utilizado, colocado nos lisímetros, as perdas por lixiviação eram inevitáveis, por menores que fossem.

Existem estudos que não atestam as vantagens das fertirregas fraccionadas, aplicadas através de sistemas de regagota-a-gota, sobre poucas aplicações de cobertura em rega de superfície. Swietlik (1992) refere um estudo realizado com toranjeiras, no Texas, no qual observou que sucessivas fertirregas em plantas de quatro anos não trouxeram benefícios em relação a duas aplicações em cobertura com rega de superfície, podendo essa situação ser explicada pelo facto de as plantas jovens de citrinos demorarem a “responder” à fertilização, devido a factores tais como as reservas que trazem dos viveiros, principalmente as que vêm em pequenos contentores, as relativamente baixas necessidades e a mineralização da matéria orgânica (Swietlik, 1992).

Alva e Paramasivam (1998) realizaram um estudo, com laranjeiras Hamlin enxertadas sobre tangerineira Cleopatra com 19 anos, num solo de textura arenosa, no qual compararam a eficiência de utilização de 3 tipos de fertilizantes diferentes, durante 3 anos, através de miniaspersores de débito de 83 L/h. à pressão de 0,276 MPa. Consideraram 4 níveis de N - 112, 168, 224 e 280 Kg de N/ha - sob a forma de nitrato de amónio, aplicando-os por fertirregua ou em cobertura e consideraram também 3 níveis de fertilização com um fertilizante de libertação lenta, no caso ureia polimerizada, que foram de 56, 112 e 168 Kg de N/ha. As frequências de aplicação foram de 4 vezes por ano para o adubo sólido, 15 para a fertirregua e uma única aplicação anual do fertilizante de libertação lenta. A duração das regas foi de modo a que a água não humedecesse as profundidades abaixo dos 0,90 m. As maiores produções foram atingidas na modalidade de fertirregua e as menores na em que se utilizou o fertilizante de libertação lenta. Para monitorizar as concentrações de N-NO₃⁻ na solução de solo foram instaladas cápsulas de sucção para recolha da solução, sendo as determinações por cromatografia. As concentrações mais elevadas ocorreram nos níveis de 224 e 280 Kg/ha das modalidades da fertirregua, às profundidades de 0,60 a 1,20 m com concentrações da ordem das 30 a 100 mg/L de N-NO₃⁻, embora os picos não persistissem durante muito tempo; nas modalidades em que se aplicou o fertilizante em cobertura, nos 2 níveis de N mais elevados, as concentrações de N-NO₃⁻, às mesmas profundidades, oscilaram entre 5 e 12 mg/L; nas modalidades em que se aplicou o fertilizante de libertação lenta, as concentrações de N-NO₃⁻ na solução do solo, às profundidades de 1,20 e 1,40 m, foram sempre inferiores 5 mg/L. A conclusão final foi que a diminuição da lixiviação do azoto está associada a uma optimização das regas e a uma fertilização de acordo com as necessidades da cultura ao longo do seu ciclo cultural.

Na Florida, região dos Estados Unidos com uma grande área de produção citrinos, existe a preocupação de manter os teores do N-NO₃⁻ das águas subterrâneas abaixo das 10 mg/L, em condições particularmente dificeis, atendendo aos solos de textura ligeira e ao tipo de clima com temperatura média anual de 27° C e precipitação média de cerca de 1500 mm, concentrada nos meses mais quentes, cerca de 60% da precipitação ocorre de Junho a Setembro, ao contrário do nosso clima mediterrâneo em que praticamente não chove no Verão. Nesse tipo de clima, as elevadas temperaturas e humidades contribuem para uma elevada taxa de mineralização da matéria orgânica, que mesmo em solos arenosos poderá levar à produção de cerca de 40 a 153 Kg de azoto/ha/ano, a partir das folhas secas e de outros materiais vegetativos que caem no solo e também da regular decomposição das fibras

radiculares (Dou *et al.*, 1997), os quais também poderão contribuir para a lixiviação, no caso de não serem contabilizados no cálculo da fertilização.

A contabilização do N fornecido por essa matéria orgânica permitirá uma utilização mais racional do azoto de modo diminuir as perdas associadas à existência de excessivas quantidades de N presentes no solo.

As quantidades de N indicadas na diversa bibliografia para a fertilização de citrinos variam bastante. Existe, no entanto, uma tendência para as quantidades a utilizar serem cada vez menores, como reflexo da maior eficiência de aplicação conseguida pelos sistemas de rega localizada. Para a Zona Vulnerável da Campina de Faro e também para a “Produção Integrada de Citrinos” foi proposto um máximo de 200 Kg/ha/ano de N, já contabilizando as quantidades veiculadas pela água de rega. Esse valor permitirá obter produtividades superiores a 40 toneladas por hectare, em pomares de alto rendimento.

As quantidades propostas de N para plantas jovens são as que se apresentam no quadro 6.1.

Quadro 6.1
Quantidades de N admitidas para “Produção Integrada de citrinos”

Idades	gramas/planta
1	40
2	80
3	120
4	160
5	240
6	320

Para as situações comuns, as quantidades de N preconizadas para as nossas condições são as que se apresentam no quadro 6.2.

Quadro 6.2
Fertilização azotada dos citrinos

Idades	gramas/planta
1-2	40-80
3-4	120-160
5-6	240-320
7-8	410-500
9-10	550-600
>10	600-700

É também recomendado que a fertilização seja fraccionada de acordo com o que se apresenta no quadro 6.3.

Quadro 6.3
Fraccionamento da fertilização recomendado para citrinos

Meses	% do total anual
Março	10
Abril	10
Maio	15
Junho	20
Julho	20
Agosto	15
Setembro	10

6.2.1 Influência do material vegetal

Também o tipo de porta-enxerto tem influência na eficiência da absorção do N. Num estudo realizado na Florida, Syvertsen e Smith (1996) observaram que em toranjeiras o porta-enxerto limoeiro volkameriana era mais eficiente que a laranjeira azeda na absorção de N, tendo a eficiência média sido de 68% para as árvores enxertadas sobre volkameriana e de 61% para as árvores enxertadas sobre laranjeira azeda. Trabalhos realizados em Chipre (Gregoriou e Economides, 1994) também demonstraram que para além do limoeiro volkameriana, também o limoeiro rugoso tem uma grande eficiência na absorção de N.

As toranjeiras necessitam também de menos quantidades de N que as laranjeiras, de acordo com Dou *et al.* (1997) que referem 0,79 Kg de N removido por tonelada de produção para as toranjeiras e de 1,39 para as laranjeiras. Nas laranjeiras, as do tipo “Navel” necessitam de maiores quantidades de N que as “Valencia Late” (Du Plessis, 1996).

6.2.2 Utilização de inibidores da nitrificação

Nos últimos anos têm sido realizados estudos sobre a utilização de inibidores da nitrificação, colocando-se algumas reservas sobre a sua eficiência quando em condições de temperaturas elevadas que favoreçam a nitrificação.

Bañuls *et al.* (2000) aplicaram 3,4 – dimetilpirazol fosfato (DMPP) junto com sulfato de amónio, através da água de rega, num sistema de regagota-a-gota, para inibir a nitrificação em laranjeiras da cultivar “Valencia Late” instaladas em vaso e no interior de uma estufa, em que as temperaturas variaram de 16 a 20° C durante a noite e de 26 a 32° C durante o dia. Concluíram que o maior crescimento e o maior peso das plantas ocorreu numa modalidade em que se aplicou o sulfato de amónio juntamente com o DMPP, como consequência de menores perdas de N-NO_3^- por lixiviação, por se terem mantido níveis mais elevados de NH_4^+ e valores menores de NO_3^- no solo, comparados com os da modalidade em que se aplicou somente sulfato de amónio, na mesma quantidade, o que poderá ter favorecido a absorção de N pelas plantas atendendo a que os citrinos são capazes de absorver o NH_4^+ a maiores velocidades que o NO_3^- (Serna *et al.*, 1992). Por outro lado não foram observados sintomas de toxicidade nas plantas o que permite concluir que pode ser uma boa prática cultural para promover a diminuição das perdas de N por lixiviação.

7. TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo tiveram como objectivo a monitorização da lixiviação de nitratos numa situação de fertirrega de citrinos, a partir da determinação da drenagem e da concentração de nitratos na solução do solo. Decorreram no Centro de Experimentação Horto-Frutícola do Patacão da DRAALG, num ensaio de fertilização azotada em laranjeiras de cultivar "Lane Late", instalado em Abril de 1999, com compasso de plantação de 3,5 m na linha e 5,0 m na entrelinha, ocupando uma área de cerca de 3000m². As árvores foram plantadas em camalhão com cerca de 0,50 m de altura em relação ao terreno natural.

Este pequeno pomar foi escolhido pelo facto de dispor de equipamento automatizado que permite aplicar com rigor as quantidades previstas de água e de fertilizantes. O facto de ser um pomar jovem, sem produção, permite também simultaneamente a recolha de elementos sobre a fertilização de jovens laranjeiras que normalmente não vem descrita na bibliografia da especialidade.

No trabalho estudaram-se três níveis de fertilização azotada. O nível mais baixo corresponderá, teoricamente, a uma fertilização deficitária em azoto, o nível intermédio corresponde, sensivelmente, ao que é preconizado, pela bibliografia, para plantas jovens e o nível mais alto corresponde a uma fertilização excessiva. Os trabalhos iniciaram-se em finais de Outubro de 1999, por só nesta altura ter sido possível adquirir o equipamento necessário, tendo sido concluídos no final de Setembro de 2000.

7.1 Características do solo do ensaio

O solo onde está instalado o ensaio é podzolizado, sendo praticamente plano. Foi aberto e estudado um perfil do solo, do qual se apresenta a descrição, com as respectivas características físicas e químicas.

As características físicas foram obtidas no laboratório da Estação Agronómica

Nacional e as químicas foram determinadas no Laboratório de Solos e Fertilidade da DRAALG, situado em Tavira.

7.1.1 Descrição de um perfil do solo

O solo, segundo a classificação portuguesa, é um podzol hidromórfico com surraipa de areias ou arenitos (Pzh), descrevendo-se o perfil aberto da seguinte forma:

A1 0-0,35 m Pouco fresco; pardo acinzentado claro 10YR 6/2 (s);

pardo a pardo escuro 10 YR 4/3 (h); arenoso; algum saibro e cascalho de Quartz; compacidade mínima; solto; sem estrutura; muitas raízes finas, raras médias.

Transição nítida para

A2 0,35-0,55 m Pouco fresco; cinzento claro 10RY 7/2 (s); pardo acinzentado 10 YR 5/2 (h); arenoso; bastante saibro e cascalho de quartzo; compacidade mínima; solto; sem estrutura; algumas raízes finas; raras manchas pequenas acastanhadas ferruginosas.

Transição nítida para

B2g 0,55-0,70 m Pouco fresco; pardo muito pálido 10 YR 8/3 (s); pardo pálido 10 YR 6/3 (h); arenoso; sem estrutura; compacidade mínima; solto; alguma pedra miúda de surraipa em linha descontínua; sintomas mais ou menos evidentes de redução pelo destaque de algumas manchas pequenas e médias castanhas de material ferruginoso.

Transição abrupta para

C1g 0,70-1,25 m Fresco; material originário pardo muito pálido 10 YR 7/4

(s); pardo amarelado claro 10 YR 6/3 (h); arenoso; algum saibro, cascalho e pedra miúda de quartz rolado e de surraipa; estrutura grumosa média fraca; bastantes manchas castanhas e avermelhadas que reflectem variações de oxidação e redução

intensas; medianamente poroso, poros muito finos e finos.

Transição abrupta para

C2r 1,25-1,55 m Material originário acentuadamente reduzido proveniente de arenitos pouco consolidados de compacidade elevada e fortemente manchado de tons castanhos com laivos acinzentados, assente em camada pouco permeável

7.1.1.1 Características físicas

Do perfil aberto na parcela, recolheram-se amostras não perturbadas de solo, a partir das quais se determinaram as características físicas do solo, no Laboratório de Pedologia da Estação Agronómica Nacional (EAN).

Determinaram-se as características no estado natural, depois de passadas no crivo de 0,002 m.

Nos quadros 7.1 e 7.2 apresentam-se os resultados dessas análises.

Quadro 7.1
Características físicas das amostras de solo não crivadas

Profundidade (m)	0-0,10	0,20-0,30	0,40-0,50
Densidade aparente	1,42	1,55	1,65
Porosidade total (%)	40,3	38,8	34,5
Capacidade máxima para a água (%)	28,4	25,0	20,9
Teor de humidade (%) a pF:			
1,5	16,8	19,6	15,8
2,0	6,0	8,1	3,6
2,5	4,4	4,3	2,1
2,7	3,9	3,8	1,8
3,0	3,5	3,5	1,7
4,2	2,8	2,5	1,5

Consideraram-se como valores correspondentes à capacidade de campo os correspondentes a pF 2,0 de acordo com Costa (1973).

Quadro 7.2
Características físicas das amostras crivadas (<0,002 m)

Descrição	0-0,35 m	0,35-0,55 m	0,55-0,70 m	0,70-1,25 m
Elementos grosseiros > 0,002 m (%)	5,3	12,5	10,6	7,4
Humidade (%)	0,39	0,19	0,12	0,21
Areia grossa (%)	66,0	64,5	68,2	58,8
Areia fina (%)	30,3	32,2	27,3	34,9
Limo (%)	2,5	2,4	3,6	4,8
Argila (%)	1,2	0,9	0,9	1,5
Textura	Arenosa	Arenosa	Arenosa	Arenosa
Densidade aparente	1,60	1,61	1,56	1,54
Porosidade total (%)	34,6	33,3	32,6	32,6
Capacidade máxima para a água (%)	21,6	20,7	20,9	21,2
Expansibilidade (%)	0,0	0,0	0,0	0,0
Contractilidade (%)	0,0	0,0	0,0	0,0
Teor de água a pF (%)				
1,5	14,6	12,7	10,0	10,4
2,0	5,2	4,2	4,2	6,3
2,5	3,6	2,7	2,6	4,1
2,7	3,0	2,3	2,2	3,4
3,0	2,5	1,8	1,8	2,8
4,2	1,5	1,1	0,8	1,0

A partir das características de amostras no estado natural, determinaram-se as curvas características de humidade, para as profundidades de 0,10, 0,30 e 0,90 m que se apresentam na figura 7.1.

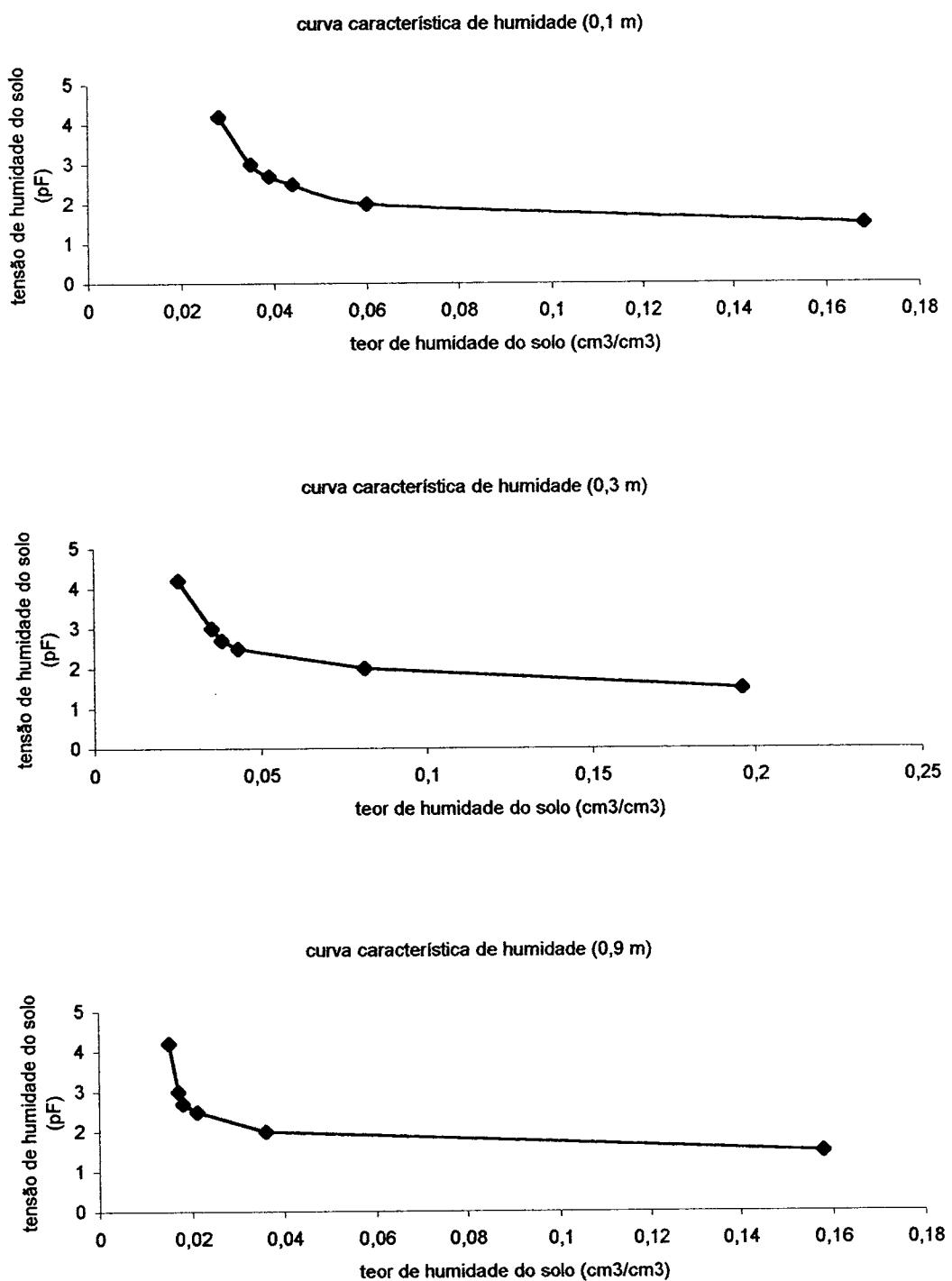


Figura 7.1 Curvas características de humidade do solo do ensaio

7.1.1.2 Características químicas

Através de uma sonda de hélice, recolheram-se amostras de solo, compósitas, as quais foram analisadas no Laboratório de Solos e Fertilidade da DRAALG e, apresentando-se os resultados no quadro 7.3:

Quadro 7.3
Características químicas do solo

Parâmetros	0-0,25 m	0,25-0,50 m	0,50-0,75 m
Fósforo (P_2O_5) (ppm)	33	22	23
Potássio (K_2O) (ppm)	20	16	28
Matéria orgânica (%)	0,7	0,6	0,4
Carbono orgânico (%)	0,4	0,3	0,2
Azoto total (%)	0,03	0,04	0,03
Relação C/N	13,53	8,7	7,73
Textura	Grosseira	Grosseira	Grosseira
PH (H_2O)	6,2	6,5	6,6
Calcário total (%)	0	0	0
Condutividade eléctrica (mmhos/cm)	0,1	0,1	0,1
Ferro (ppm)	32	34	26
Manganês (ppm)	9	4	2
Zinco (ppm)	0,1	0,1	0,1
Capacidade de troca catiônica			
Bases de troca (meq/100g):			
Cálcio	0,50	0,30	0,25
Magnésio	0,01	0,01	0,01
Potássio	0,13	0,05	0,03
Sódio	0,17	0,04	0,13
Soma	0,81	0,40	0,42
Hidrogénio de troca	1,0	1,40	0,40
Capacidade de troca	1,81	1,80	0,82
Grau de saturação (%)	44,8	22,2	51,2

7.2 Material e métodos

Atendendo à textura arenosa do solo e ao método de rega utilizado,gota-a-gota, em que as áreas humedecidas pelos gotejadores são de muito pequena dimensão, cerca de 0,40 m de diâmetro, optou-se pela utilização de equipamentos não destrutivos para medir os teores de humidade e para recolher a solução do solo, sempre nos mesmos pontos do solo.

Assim, utilizou-se uma sonda de humidade tubular TDR e uma sonda capacitiva para medir os teores de humidade volúmica no solo e instalaram-se cápsulas porosas de sucção, de cerâmica, de 0.015 m de diâmetro, para recolher a solução do solo. As determinações dos teores de nitratos realizaram-se também no Laboratório de Solos e Fertilidade da DRAALG, através de potenciometria com ião selectivo.

A partir da equação da convecção, desprezando a contribuição do processo de difusão, determinaram-se as quantidade lixiviadas de cada camada de solo. Apresenta-se uma resumida descrição dos equipamentos e a descrição da metodologia utilizada.

Para o estudo da lixiviação dos nitratos escolheram-se ao acaso quatro árvores de cada um dos três níveis de fertilização com N. O ensaio é composto por blocos de 4 árvores, tendo 3 repetições. As árvores foram escolhidas ao acaso das 3 repetições, havendo uma repetição com duas árvores escolhidas. Como já foi referido, o segundo nível é quádruplo do primeiro e o terceiro é quádruplo do segundo.

Junto a um dos gotejadores de cada árvore, instalaram-se duas cápsulas porosas de sucção, para recolha da solução do solo, às profundidades de 0,3 e 0,9 m e um tubo de 0,044 m de diâmetro, em PVC, para acesso a uma sonda tubular TDR, para determinação do teor de humidade volúmica do solo. Foram, por conseguinte, instalados um total de 12 tubos de acesso e de 24 cápsulas junto às árvores escolhidas.

Foram ainda instalados mais um tubo de acesso e duas cápsulas de sucção, às mesmas profundidades, num local não regado nem fertilizado, e sem planta, para se conhecer a taxa de mineralização do solo, tendo sido recolhidos dados somente no período em que ocorreu precipitação, não tendo sido possível recolher a solução do solo a partir do mês de Junho em que o reduzido teor de humidade do solo não permitiu a extracção da solução.

7.2.1 Regas e fertilizações

7.2.1.1 Sistema de rega

O ensaio dispõe de um sistema de rega gota a gota com gotejadores autocompensantes de débito nominal de 3,8 L/h. As condutas de distribuição e os ramais, de 0,016 m de diâmetro interior, são de polietileno (PE) preto, com os gotejadores já inseridos, mas “tapados”, podendo-se “descobrir” à medida que as plantas crescem. No período em que decorreram os trabalhos de monitorização, cada planta foi regada por dois gotejadores.

O sistema de rega é controlado através de um programador que assegura a correcta gestão das regas e fertirregas, através do controlo das electroválvulas sectoriais e das bombas injectoras eléctricas de fertilizantes que funcionam individualmente para cada sector. Cada sector de rega corresponde a um nível de N. Os volumes de rega foram assegurados pelo tempo de funcionamento de cada sector, assumindo que os débitos reais dos gotejadores correspondiam aos nominais, o que se verificou no campo, em que a uniformidade observada foi excelente.

Estudou-se a uniformidade de débito dos 12 gotejadores em cujos bulbos foram instalados os tubos de acesso e as cápsulas de cerâmica, para se avaliar a uniformidade de rega e consequentemente a uniformidade de fertilização.

Para isso, recolheram-se os volumes debitados durante seis minutos por cada gotejador foram medidos e esse valores, multiplicados por dez, foram convertidos em L/h.

Os valores médios excederam ligeiramente o débito nominal, situando-se em cerca de 4,05 L/h, sendo o desvio padrão de 0,12 L e o coeficiente de variação de cerca de 2,97%.

O equipamento revelou, assim, uma boa uniformidade de débito e demonstrou assegurar o efeito autocompensante, mantendo o mesmo débito para uma gama de pressões que variaram entre 1 e 3 Kg/cm², no período estudado.

7.2.1.2 Dotações de rega

As dotações de rega foram determinadas através dos valores médios dos anos anteriores, desde 1986, dos registos da evapotranspiração potencial obtidos a partir de uma tina de evaporação de classe A, situada nas proximidades do ensaio. As dotações de rega foram iguais para os três níveis de fertilização.

Para a determinação das dotações de rega, utilizou-se a metodologia proposta por Gimenez-Montesinos (1997) referida no capítulo 6, tendo sido calculadas as dotações de rega diárias, por planta, que se indicam no quadro 7.4.

Quadro 7.4
Dotações de rega diárias em 1999

Mês	Dotação (L/planta)
Junho	7
Julho	10
Agosto	10
Setembro	8
Outubro	6

Em Outubro de 1999 as dotações de rega regas foram inicialmente algo elevadas devido às elevadas temperaturas, para a época, registadas na altura. As regas foram suspensas de 20 de Outubro a 4 de Novembro.

Em 5 e 8 de Novembro aplicaram-se 7,5 litros por planta em cada rega. As regas foram novamente suspensas até 18 de Novembro. A partir de 19 de Novembro, passou-se a regar quatro vezes por semana com dotações de 3,8 L/dia/planta.

As dotações de rega durante o ano de 2000 são as que se apresentam no quadro 7.5.

Na primeira quinzena de Setembro, em virtude das elevadas temperaturas e do intenso crescimento das plantas decidiu-se manter a dotação dos meses de Julho e Agosto.

Quadro 7.5
Dotações de rega em 2000

Mês	Frequência das regas (dias/semana)	Dotação (L/planta)
Fevereiro	2	6,6
Março	4	7,3
Abril	Diária	4,4 (a)
Maio	Diária	7,0 (b)
Junho	Diária	10,3
Julho	Diária	11,0
Agosto	Diária	11,0
Setembro	Diária	11,0

- a) a partir de 19/04
b) primeira rega em 16/05

7.2.1.3 Fertilização

A fertilização foi a previamente definida no âmbito do ensaio já instalado. No quadro 7.6 indicam-se as fertilizações totais anuais aplicadas.

Quadro 7.6
Fertilizações totais anuais

Ano	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
	g/planta	Kg/ha	g/planta	Kg/ha	g/planta	Kg/ha
1999	6	3,43	24	13,72	96	54,9
2000	15	8,6	60	34,3	240	137

O nível 1 corresponde, teoricamente a uma fertilização azotada deficitária, o nível 2 ao que é geralmente preconizado para laranjeiras com um a dois anos de permanência no campo e o nível 3 a uma fertilização excessiva. No entanto, Willis *et al.* (1991) consideram que 211

g /ano de N/ planta é um valor moderado para jovens plantas nas condições da Florida, com precipitações bastante mais elevadas e em que existe a preocupação de manter os níveis do N-NO₃⁻ abaixo das 10 mg/L.

As fertilizações iniciaram-se em 28 de Junho de 1999, com os três macronutrientes principais a serem aplicados sempre por fertirrega, tendo sido praticamente diárias nos meses de verão.

As fertirregas realizaram-se praticamente sempre que se regava, não se fertilizando no primeiro quarto ou terço do tempo de rega, para evitar as lixiviações dos nutrientes aplicados na fertirrega, nem nos últimos dez minutos, para limpeza das tubagens, de modo a evitar a permanência de resíduos dos fertilizantes no interior das condutas.

Para assegurar a fertilização azotada, utilizou-se nitrato de amónio, doseando cerca de 34.2% de N, segundo a informação contida na embalagem. As dotações mensais de N foram as que se indicam no quadro 7.7.

No quadro 7.8 indica-se o número de fertirregas realizadas em cada um dos meses. De referir que no mês de Abril realizaram-se mais eventos de fertirrega do que de rega propriamente dita, pois como houve muitos dias de precipitação, realizaram-se pequenas regas apenas com o objectivo de aplicar os fertilizantes.

As concentrações de NO₃⁻ que teoricamente existiriam na água de rega, nas diversas fertirregas realizadas, em função da dotação de rega e das dotações de N calculadas para o mês em causa são as indicadas no quadro 7.8 e foram calculadas através da expressão 5.1. Na realidade, essas quantidades poderão ter sido mais elevadas devido ao facto de o tempo de fertirrega ser inferior ao tempo de rega.

As dotações dos outros dois macronutrientes principais, fósforo e potássio, foram iguais para os três níveis. Estas fertilizações realizaram-se também por fertirrega. Na fertilização fosfatada utilizou-se ácido fosfórico, que doseia cerca de 53% de P₂O₅, com densidade de cerca de 1,6, e na fertilização com potássio utilizou-se sulfato de potássio apropriado para fertirrega que doseia cerca de 50 % de K₂O.

O ácido fosfórico teve três ou quatro aplicações consecutivas, durante cada mês, sendo aplicado isoladamente, não sendo misturado com os outros fertilizantes para se evitar precipitações e para que simultaneamente pudesse desfazer algumas partículas sólidas resultantes de precipitações químicas que pudesse ter ocorrido anteriormente. O sulfato de potássio foi aplicado simultaneamente com o nitrato de amónio. Houve, portanto, dias em que não se fertilizou com azoto, correspondendo aos dias em que se aplicou o ácido fosfórico ou pesticidas.



No quadro 7.9 apresentam-se as respectivas dotações mensais destes dois elementos.

Quadro 7.7
Dotações de N aplicadas nos 3 níveis de fertilização (gramas/planta)

	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Julho/99	2	8	32
Agosto/99	2	8	32
Setembro/99	1	4	16
Outubro/99	1	4	16
Março/2000	0,75	3	12
Abril/2000	1,5	6	24
Maio/2000	1,5	6	24
Junho/2000	2,25	9	36
Julho/2000	3	12	48
Agosto/2000	3	12	48
Setembro/2000	2,25	9	36
0			

Quadro 7.8
Concentrações de NO_3^- esperadas na água de rega durante as fertirregas

Meses	Dot. de rega (L/planta)	Nº de fertirregas	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
			N	$[\text{NO}_3^-]$	N	$[\text{NO}_3^-]$	N	$[\text{NO}_3^-]$
Março	4,4	20	0,75	18,9	3	75,5	12	302,0
Abri	4,4	26	1,5	29,0	6	116,1	24	464,5
Maio	7	13	1,5	36,5	6	146,0	24	584,0
Junho	10,3	24	2,25	20,2	9	80,6	36	322,5
Julho	11	23	3	26,3	12	105,0	48	420,1
Agosto	11	25	3	24,2	12	96,6	48	386,5
Setembro	8	25	2,25	24,9	9	99,6	36	398,6

N quantidade de N aplicado (g/planta)

$[\text{NO}_3^-]$ concentração de nitratos na água de rega (mg/L)

Quadro 7.9
Dotações de P_2O_5 e K_2O aplicadas (gramas/planta)

	P_2O_5	K_2O
Julho/99	1,5	3
Agosto/99	1,5	4
Setembro/99	1	4
Outubro/99	1	3
Março/00	1,5	1,25
Abril/00	1,5	1,25
Maio/00	2,25	2,5
Junho/00	2,25	2,5
Julho/00	2,25	3,75
Agosto/00	2,25	5
Setembro/00	1,5	5

7.2.2 Metodologia utilizada para o cálculo das quantidades lixiviadas

Para se estimar as quantidades lixiviadas, num determinado intervalo de tempo, é também necessário determinar a drenagem, resultante do movimento da água no solo causado pelos eventos de precipitação ou de rega, e a concentração dos nitratos na solução do solo.

Assumiu-se, nesta situação em que o solo é bastante arenoso, que se poderá considerar que o movimento do soluto é unidimensional vertical e que o volume de solo humedecido pelos gotejadores tem a forma de um cilindro. Desprezou-se também a contribuição da dispersão para o fenómeno da lixiviação, considerando-se apenas a convecção, de acordo com Kengni (1994).

A quantidade de $N-NO_3^-$ lixiviada, L_N , abaixo da profundidade considerada, z , foi, assim, calculada através da expressão (7.1), já apresentada (item 2.7.8; pág. 31), na descrição da metodologia utilizada por Kengni (1994):

$$L_N = DC_z \quad (7.1)$$

Em que L_N é a lixiviação de nitratos, D a drenagem, ou percolação profunda, e C_z a concentração de nitratos na profundidade considerada.

Considerou-se também que só existiria lixiviação quando houvesse movimento do soluto abaixo dos 0,9 m de profundidade, em que provavelmente não existiria uma grande quantidade de raízes capazes de absorver a água e os nutrientes, nem nesta fase do desenvolvimento das plantas nem no futuro.

Para a situação de fertirrega, considerou-se que só haveria lixiviação nas superfícies humedecidas pelos gotejadores, considerou-se de 0,4 m o diâmetro médio dos círculos humedecidos pelo gotejadores. Nos cálculos por “hectare” considerou-se apenas a área total dos círculos humedecidos, contidos no hectare.

7.2.2.1 Determinação da drenagem

Usualmente (Kengni *et al.*, 1994; Moreno *et al.*, 1996), determina-se a drenagem através da expressão (3.26), sendo a condutividade hidráulica determinada por equações como a de Brooks e Corey ou a de Van Genuchten já apresentadas anteriormente no capítulo 3.

Atendendo à dificuldade de medição de alguns parâmetros do solo necessários para a utilização dessas equações, optou-se por determinar a drenagem através da realização de balanços hídricos.

Consideraram-se dois tipos de situações: a correspondente à época de outono-inverno em que não houve fertirregas e a situação de fertirrega que decorreu no período primavera-verão, com início em Março.

Na época de outono-inverno, como as variações do teor de humidade do solo, entre dois eventos de precipitação ou de rega, não diária, são bastante graduais, realizaram-se balanços hídricos para cada ponto observado, para cada intervalo de tempo entre dois eventos de monitorização, utilizando-se para isso a expressão (7.2), já apresentada (item 2.7.8; pág. 30), na descrição da metodologia utilizada por Kengni (1994):

$$\Delta S = R + I - D - AET \quad (7.2)$$

em que ΔS é a variação da água armazenada (mm) no perfil do solo explorado pelas raízes, R é a precipitação (mm), I a dotação de rega (mm), D é a drenagem (mm), na profundidade z correspondente à zona radical e AET a evapotranspiração cultural actual, estimada através da metodologia já descrita anteriormente, sendo a variação do volume de água armazenada no solo determinada directamente através das medições periódicas do teor de humidade.

O teor de humidade volúmica do solo foi monitorado através de medições semanais às profundidades de 0,10, 0,30, 0,60 e 0,90 m através de uma sonda tubular TDR (Time Domain Reflectrometry), tendo sido medido sempre nos mesmos pontos, a cerca de 0,1 m do gotejador.

Os valores de R foram obtidos directamente da estação meteorológica existente a cerca de 200 m do local.

Para a situação de primavera-verão com regas muito frequentes, praticamente diárias, com o teor de humidade a variar constantemente ao longo do perfil do solo, num processo contínuo, de humedecimento-secagem e devido à impossibilidade de se poder acompanhar permanentemente o teor e humidade do solo, durante e após as regas, com a sonda tubular nos 12 pontos, por ser impraticável, optou-se por se utilizar apenas os dados de uma sonda capacitiva, por esta estar ligada a um “aquisidor de dados”, permitindo o registo contínuo da evolução do teor de humidade ao longo do perfil do solo. O facto de a drenagem calculada durante o inverno ter sido bastante uniforme nos diversos pontos, conforme se pode observar no quadro 7.11, reforçou também esta opção. O cálculo da drenagem foi também determinado de forma diferente, tendo sido estimada através da simples variação do teor de humidade na camada de solo abaixo das raízes (0,6 a 0,9 m), através da análise dos gráficos resultantes das sucessivas medições (com cerca de dez minutos de intervalo) do teor de humidade do solo realizadas pela sonda capacitiva, de acordo com o preconizado por Fares e Alva (2000) e já referido anteriormente (item 2.7.8; pág. 31).

A sonda capacitiva, colocada a cerca de 0,1 m do gotejador, permitiu também observar perfeitamente a variação do teor de humidade do solo nas camadas mais profundas em função do tempo de funcionamento do gotejador, enquanto que a colocação de uma outra, mais afastada, permitiu avaliar o movimento lateral nas camadas mais profundas.

7.2.2.2 Monitorização do teor de nitratos da solução do solo

Para recolha da solução do solo foram instaladas no solo cápsulas de sucção, porosas de cerâmica com cerca de 0,015 m de diâmetro, a 0,3 e a 0,9 m de profundidade. Considerou-se que a solução do solo recolhida a 0,3 m indicaria a taxa de mineralização da matéria orgânica, principalmente no período outono-inverno, e a nitrificação do amónio contido no fertilizante nitro-amoniacial utilizado na fertirrega, em condições favoráveis de temperatura e humidade elevadas, e que a solução a 0,9 m permitiria estimar as quantidades de N-NO_3^- lixiviadas.

Através de uma bomba de vácuo, criaram-se sucções de cerca 70 kPa no interior das cápsulas para que, através da diferença de pressão entre o solo e o interior das cápsulas, a solução pudesse entrar nestas. A solução foi recolhida do interior das cápsulas através de uma seringa que a aspirava, através de um microtubo de polietileno que penetra no interior da cápsula, através da tampa desta.

As cápsulas de cerâmica apresentam como principais vantagens o facto de não serem destrutivas e o seu relativo baixo custo. Têm também um funcionamento simples, pois é necessária apenas uma bomba de vácuo para criar a sucção e um pequeno dispositivo para manter a sucção no seu interior e uma seringa para retirar a solução do seu interior. Têm sido utilizadas em diversos trabalhos com resultados satisfatórios (Kengni *et al.*, 1994; Moreno *et al.*, 1996)

Como desvantagem poderá referir-se que através deste equipamento só se “captam” os nitratos existentes na “água móvel” do solo (Bruckler *et al.*, 1997). Outra desvantagem, segundo Moraes e Dynia (1990), citados por Gomes *et al.* (1998), é a diminuição da taxa de infiltração na cápsula, devido a uma progressiva obstrução dos seus poros pelas partículas coloidais do solo, criando um factor de erro devido à variação temporal de certos iões como o nitrato, e também por causa de formações de camadas de argila na superfície externa que poderão retardar também a penetração dos iões em solução.

As amostras recolhidas foram vedadas e levadas para o Laboratório de Solos e de Fertilidade da DRAALG, onde se realizaram as determinações dos nitratos através de potenciometria, por ião selectivo.

7.3 Resultados e discussão

O material necessário para a recolha de solução do solo e medições do teor de humidade volémica do solo só foi instalado em Outubro, já depois de se terem realizado as últimas fertirregas de 1999 e de terem ocorrido alguns eventos de precipitação, tendo-se registado 94,4 mm de precipitação desde 1 de Setembro. Os trabalhos da monitorização iniciaram-se em 26 de Outubro de 1999, realizando-se semanalmente, nem sempre tendo sido possível recolher solução de todas as cápsulas instaladas, tendo os trabalhos decorrido até 30 de Setembro de 2000.

7.3.1 Precipitação e temperatura registadas

Os dados meteorológicos do local do ensaio foram registados na estação meteorológica do Patacão, situada a cerca de 200 m do ensaio.

Quadro 7.10
Precipitação registada no período dos trabalhos de campo

Mês	Precipitação (mm)
Setembro/99	38,6
Outubro/99	65,7
Novembro/99	50,7
Dezembro/99	22,2
Janeiro/00	65,4
Fevereiro/00	4,5
Março/00	4,6
Abril/00	112,9
Maio/00	59,1
Junho/00	0
Julho/00	0
Agosto/00	0
Setembro/00	7,1

No quadro 7.9 apresentam-se as precipitações mensais registadas desde Setembro de 1999 até Setembro de 2000 e na figura 7.2 apresentam-se as precipitações acumuladas e as temperaturas médias registadas nos períodos entre duas acções de monitorização do teor de humidade do solo e de recolha da solução do solo, durante o período em que decorreu este estudo, de 21 de Outubro de 1999 a 30 de Setembro de 2000.

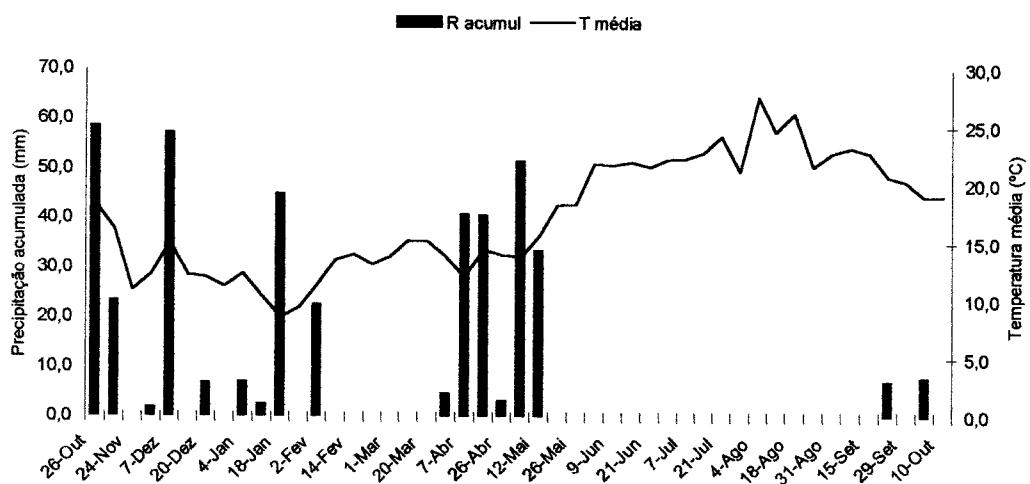


Figura 7.2. Precipitações acumuladas e temperaturas médias registadas entre dois eventos de monitorização

7.3.2 Drenagem

Os valores calculados correspondentes à drenagem ocorrida no período outono-inverno foram os que constam no quadro 7.11.

Quadro 7.11
Drenagem ocorrida no período outono-inverno (mm)

Período	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
22/10 a 25/10/99	33,7	0,3	33,6	0,6	33,7	0,3
26/10 a 15/11/99	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
16/11 a 23/11/99	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24/11 a 29/11/99	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30/11 a 6/12/99	45,1	0,6	44,7	1,1	44,8	0,4
7/12 a 12/12/99	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13/12 a 19/12/99	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
20 a 26/12/99	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27/12/99 a 3/01/000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4/1 a 12/01/00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12/01 a 17/01/00	36,2	0,6	35,9	0,5	36,2	0,9
18/01 a 24/01/00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25/01 a 01/02/00	13,3	0,4	13,2	0,2	13,4	0,1
2/02 a 7/02/00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8/02 a 13/02/00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14/02 a 21/02/00	0,3	0,1	0,5	0,4	0,1	0,0
22/02 a 1/03/00	2,3	0,3	2,2	0,2	2,5	0,1
Totais	131,2	0,6	130,3	0,4	130,8	1,3

Para se determinar a drenagem ocorrida durante o período das fertirregas, resultante das regas, foi necessário estudar o teor de humidade no solo ao longo do perfil, em função da dotação de rega, a qual está directamente associada ao tempo de rega. Como houve sempre dois gotejadores por planta, durante o período de em que decorreram os trabalhos de campo, as maiores dotações de rega, nos meses de maiores necessidades hídricas, foram concretizadas através de maiores tempos de funcionamento dos gotejadores, provocando um maior humedecimento em profundidade.

Nas figuras 7.3, 7.4 e 7.5 apresenta-se a evolução do teor de humidade no solo ao longo do perfil do solo e do tempo, num bolbo humedecido por um gotejador, correspondentes a três dotações diferentes. O teor de humidade foi medido através da sonda capacitiva com quatro sensores às profundidades de 0,1 m, 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m.

Na figura 7.3 representa-se a situação de uma rega com 35 minutos de duração, correspondendo a uma dotação de cerca de 4,4 L por planta aplicada através de 2 gotejadores de débito de 3,8 L/h. Essa dotação foi aplicada diariamente no mês de Abril, tendo a drenagem total desse mês, incluindo a resultante das precipitações e a resultante dos eventos de rega, sido de 29,5 mm, conforme se pode observar no quadro 7.12. Conforme se pode observar, a frente de humedecimento alcançou os 0,6 m de profundidade após o término da

rega, como consequência da elevada condutividade hidráulica do solo, com uma predominância também do movimento gravitacional.

Na figura 7.4 pode-se observar a situação correspondente a uma rega com 56 minutos de duração, correspondente a uma dotação diária de 7 L/planta, aplicada durante o mês de Maio. Durante esse mês a drenagem foi de cerca de 21.2 mm, como se pode observar no quadro 7.12, sendo a diferença explicada pela maior precipitação registada em Abril.

Na figura 7.5 apresenta-se o humedecimento causado por regas diárias com duração de cerca 90 minutos, cerca de 11 L/planta correspondendo aos meses de Julho a Setembro. Verifica-se que nesta situação há um claro aumento do teor de humidade à profundidade de 60 cm, pouco depois de terminada a rega, como se pode observar melhor na figura 7.6 que pormenoriza a evolução do teor de humidade durante e pouco depois de terminada a rega.

Na figura 7.5 pode-se ainda observar que a frente de humedecimento atingiu também os 0,9 m de profundidade, embora só algumas horas depois do término da rega, existindo assim perdas por percolação profunda neste período, atendendo a que nesta fase do desenvolvimento das plantas o seu sistema radical não excederá os 0,6 m de profundidade.

De uma análise cuidada realizada a todos os eventos de rega durante esses três meses, resultaram os dados que constam no quadro 7.12, em que se pode observar que foi no mês de Setembro que a drenagem foi menor, apesar de as dotações de rega terem sido iguais nesses três meses e teoricamente a evapotranspiração deveria ser menor. A explicação para tais valores reside no facto de as plantas serem jovens, em permanente crescimento, e em Setembro decorrer intensamente o terceiro e mais importante surto de desenvolvimento vegetativo.

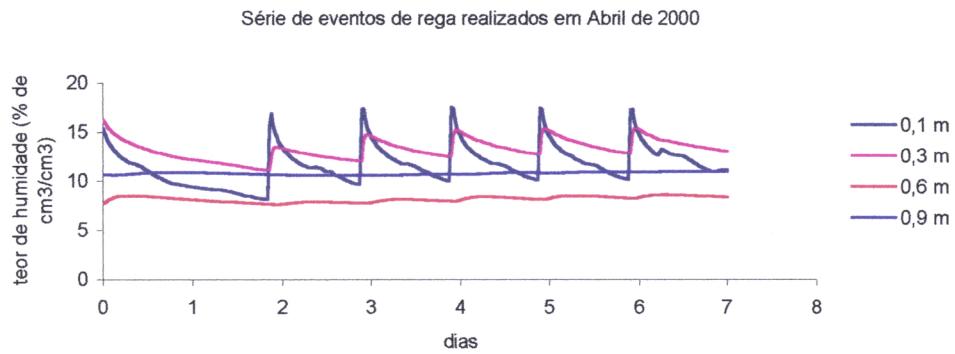


Figura 7.3 Humedecimento do solo resultante de uma rega com 35 minutos de duração, correspondente a uma dotação de 4,4 L/planta/dia

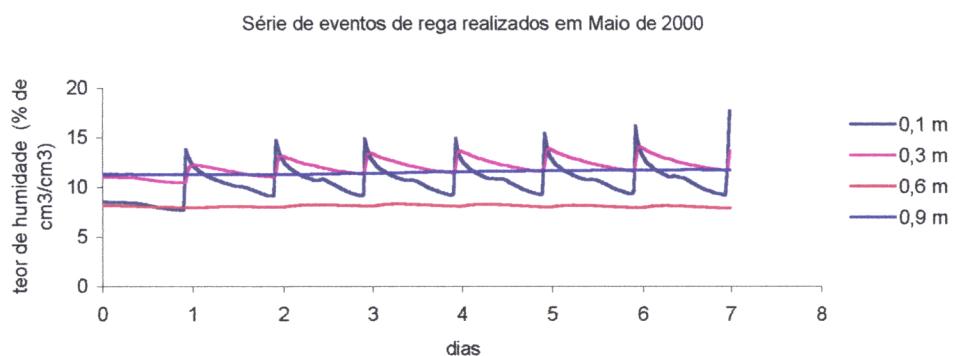


Figura 7.4 Humedecimento do solo resultante de uma rega com 56 minutos de duração, correspondente a uma dotação de 7 L/planta/dia

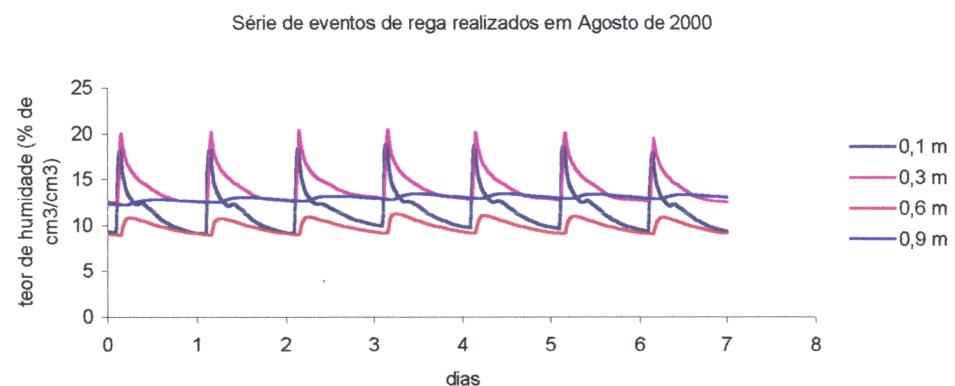


Figura 7.5 Humedecimento do solo resultante de uma rega com 88 minutos de duração, correspondente a uma dotação de 11 L/planta/dia

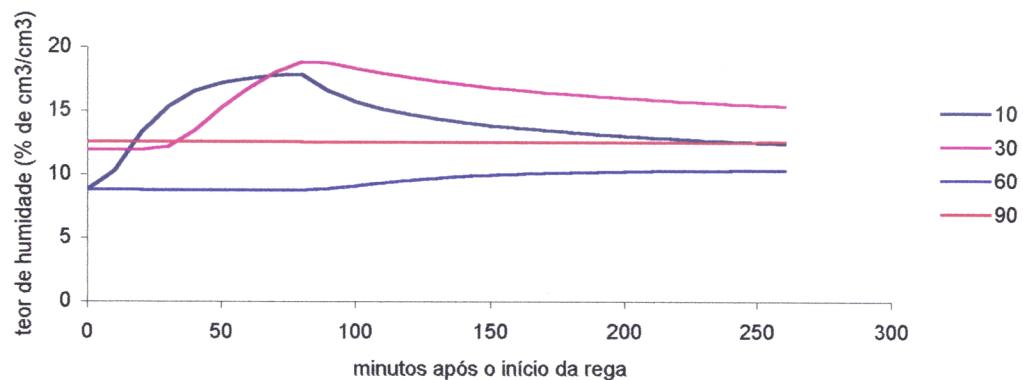


Figura 7.6 evolução do teor de humidade no perfil do solo durante e após uma rega com 90 minutos de duração com um gotejador de débito de 3,8 L/h.

No quadro 7.12 apresentam-se os valores da drenagem correspondentes ao período de primavera-verão. Registe-se que devido à reduzida área humedecida os valores da drenagem são algo elevados, por se ter contabilizado apenas a área humedecida pelo gotejador. Isto reforça a importância de que o adequado controlo da rega é fundamental para se evitar o humedecimento das camadas de solo abaixo da zona de enraizamento.

Quadro 7.12
Drenagem no período de fertirrega (mm)

Meses	Drenagem (mm)
Março	19,6
Abril	29,5
Maio	21,2
Junho	89,7
Julho	102,5
Agosto	83,3
Setembro	67,3
Totais	413,0

Os valores de drenagem atingidos foram devidos ao número de gotejadores instalados, ao débito dos gotejadores e às características hidráulicas do solo. Apenas dois gotejadores por planta implicaram que, para se garantir a aplicação da dotação de rega, principalmente

nos meses de maiores necessidades hídricas, os tempos de funcionamento dos gotejadores fossem elevados promovendo uma maior infiltração.

Para diminuir estas perdas, em situações similares, haverá algumas práticas que poderão ser utilizadas.

A realização de mais que uma rega diária, garantindo a mesma dotação, poderá ser uma boa solução para os solos de textura arenosa, de acordo com Levin *et al.* (1979), cujos trabalhos experimentais alusivos se descrevem na revisão bibliográfica.

Para se diminuir a profundidade alcançada pela frente de humedecimento, poder-se-á utilizar mais gotejadores por planta para melhor distribuir a água, promovendo uma maior superfície humedecida, para um mesmo volume aplicado. Esta solução poderá no entanto levar a que a água aplicada pelos gotejadores mais afastados das plantas não possa ser absorvida pelas raízes, atendendo a que se trata de jovens plantas com o sistema radical ainda pouco desenvolvido.

Como solução alternativa ou complementar, a utilização de gotejadores de maiores débitos aumentaria a superfície de solo humedecida, perto das plantas, e diminuiria a profundidade atingida pela frente de humedecimento.

7.3.3 Concentração de nitratos na solução do solo

7.3.3.1 Evolução durante o período de outono-inverno de 1999-2000

A evolução dos teores de nitratos na solução do solo, no período outono-inverno de 1999/2000, após as fertilizações azotadas da primavera e verão de 1999, mostrou-se bastante dependente das precipitações registadas.

A influência das fertilizações praticadas anteriormente só se terá feito sentir até ao início de Dezembro, altura em que as concentrações da solução recolhida nos pontos fertilizados com o nível 3 de fertilização terão sido ligeiramente superiores às dos outros dois níveis. A partir dessa data os teores encontrados na solução do solo dependeram principalmente da mineralização da matéria orgânica ocorrida nos diversos pontos.

Nas figuras 7.7 a 7.10 apresenta-se a evolução da concentração dos nitratos na solução do solo.

Pode-se concluir que houve, pontualmente, aumentos na concentração de nitratos na solução do solo, nos três níveis de fertilização, devidos à mineralização da matéria orgânica,

como ocorreu no período entre 7 de Dezembro e 18 de Janeiro, no qual apesar das temperaturas baixas, entre 15 e 9°C, houve alguma acumulação de N-NO_3^- no solo, tendo para isso contribuído o facto de a precipitação acumulada nesse período ter sido apenas de 16,3 mm, não havendo, assim, lixiviação.

Como se pode observar na figura 7.7, correspondente aos quatro pontos observados no nível 1, a concentração de nitratos na solução do solo a 0,3 m de profundidade, foi quase sempre inferior a 50 mg/L, com exceção de duas amostras, em dois pontos diferentes, em que numa foi obtido um valor de 70,6 mg/L de NO_3^- , em 26/10/99, e na outra, recolhida em 18 de Janeiro, se obteve o valor de 69,1 mg/L. Esses valores mais elevados terão sido consequência de uma mais elevada taxa de mineralização nos pontos em causa.

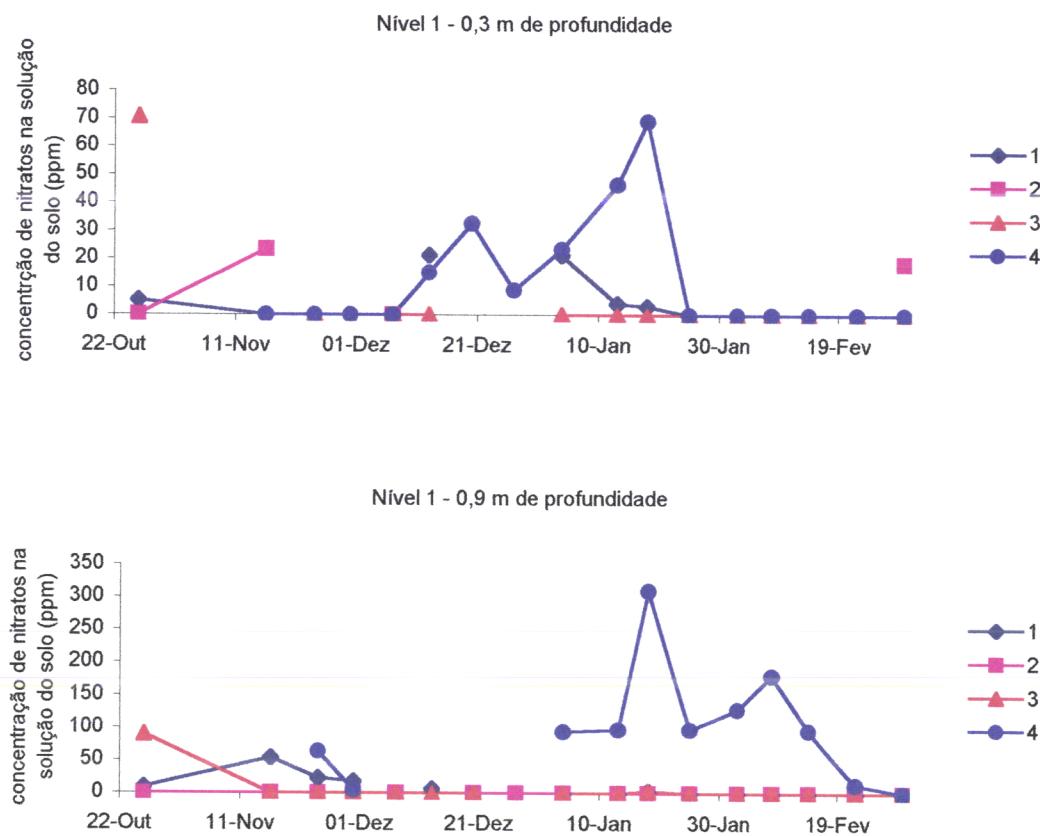


Figura 7.7 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e inverno, nos quatro pontos observados no nível 1.

No nível 2, figura 7.8, passou-se algo de semelhante, as concentrações de nitratos da solução do solo a 0,3 m de profundidade foram quase sempre inferiores a 50 mg/L, embora

com algumas exceções, como no ponto nº4, cuja solução recolhida em 18 de Janeiro registou 403 mg/L, tendo depois diminuído em consequência da precipitação registada.

Na solução recolhida a 0,9 m os valores foram tendencialmente mais elevados que os correspondentes ao nível 1, tendo ultrapassado mais vezes as 50 mg/L.

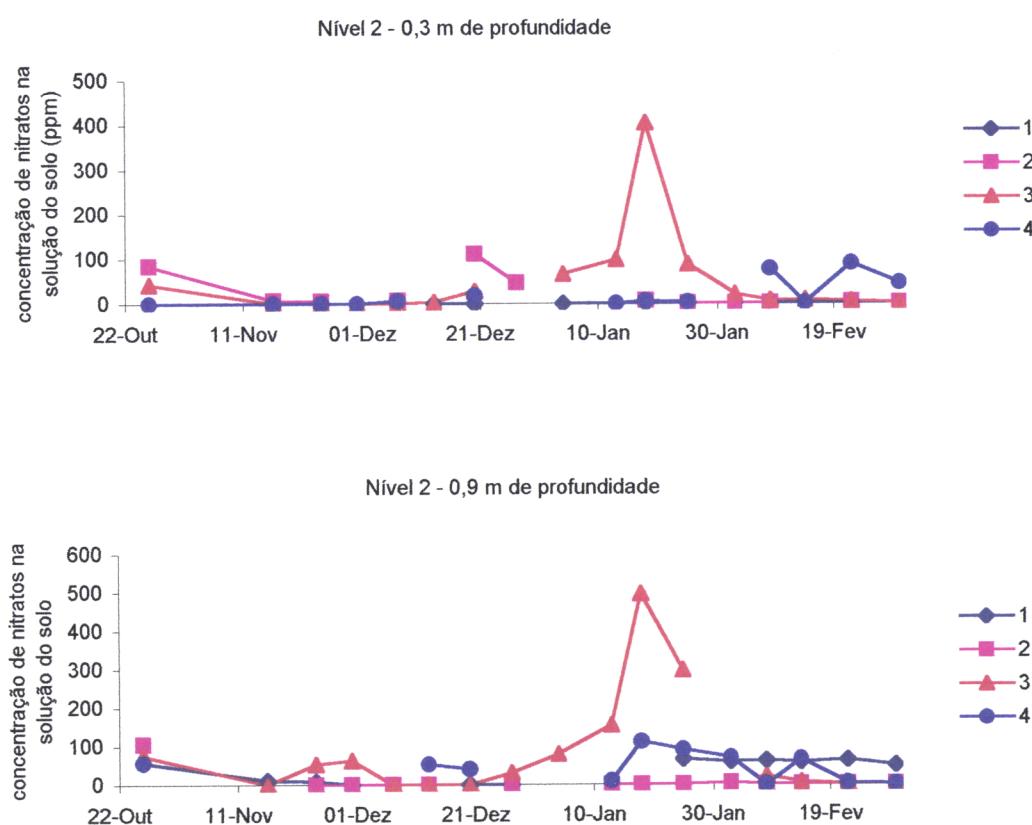


Figura 7.8 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e inverno, nos quatro pontos observados no nível 2.

Na figura 7.9, apresenta-se a evolução dos pontos do nível 3. Na solução recolhida a 0,3 m de profundidade, os valores registados apresentaram uma tendência semelhante aos dos níveis 1 e 2 à mesma profundidade. Os valores correspondentes à solução recolhida a 0,9 m tiveram uma tendência bastante semelhante ao do nível 1; isto é, foram mais baixos que os registados no nível 2 à mesma profundidade, com valores quase sempre inferiores a 0,5 m, com exceção de um ponto, no qual só por uma vez ultrapassaram as 200 mg/L, em 18/01/00, tendo diminuído depois desta data.

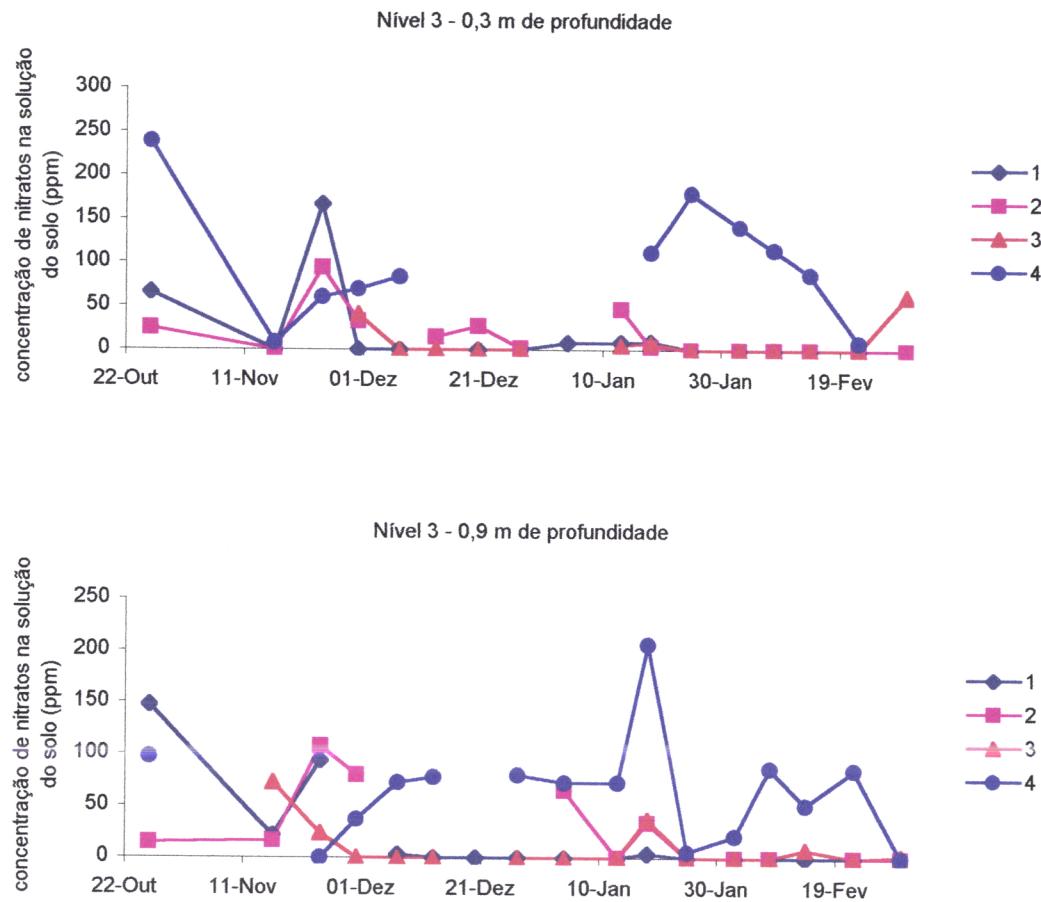


Figura 7.9 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e inverno, nos quatro pontos observados no nível 3.

Na figura 7.10 apresentam-se as médias dos valores médios de cada nível de fertilização e também os valores registados no ponto não fertilizado.

Nessa mesma figura, pode-se verificar que só até meados de Dezembro de 1999 é que o nível 3 apresentou valores superiores aos dos outros dois níveis. A partir dessa data não se observou a influência das fertilizações realizadas anteriormente.

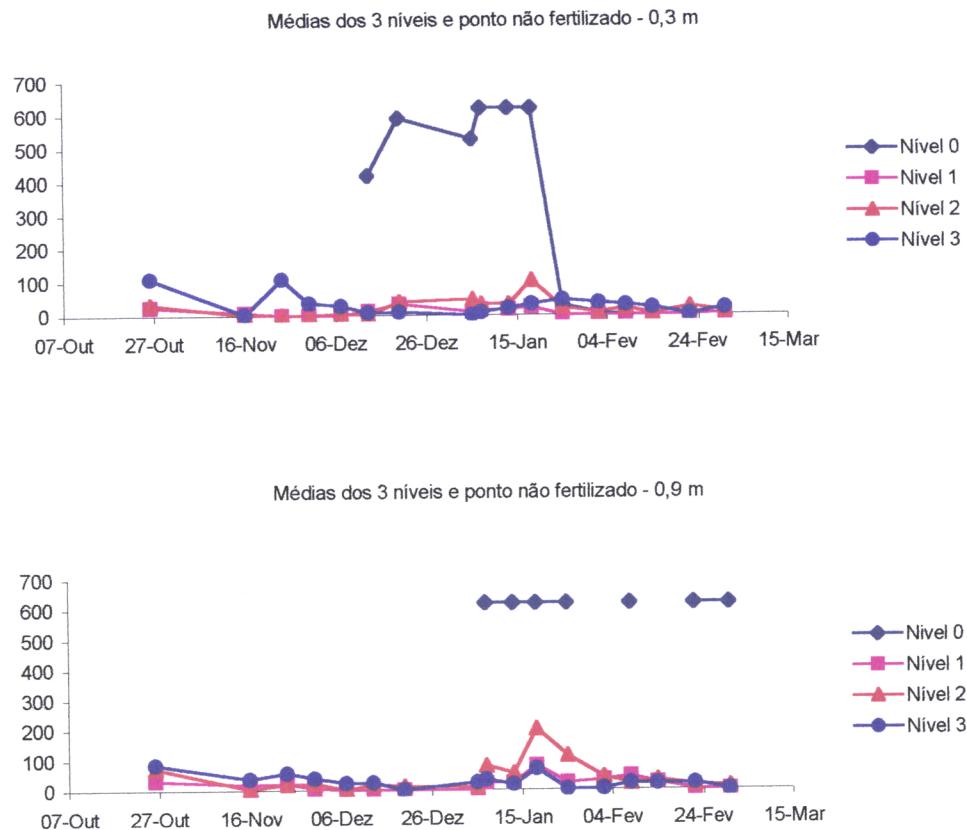


Figura 7.10 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, na época de outono e inverno, considerando os valores médios da cada nível de fertilização e o ponto onde não houve fertilização.

Pode-se observar também, apesar das reservas que merece o facto de só se ter estudado um ponto não fertilizado, o “nível zero”, foi aí que se registaram os maiores valores da concentração de nitratos, provavelmente por não haver uma árvore próxima para consumir o azoto disponível no solo.

Esse ponto foi instalado mais tarde e permitiu avaliar a mineralização da matéria orgânica, através das concentrações a 0,3 m de profundidade, a qual terá sido mais elevada entre 6 de Dezembro até 18 de Janeiro, apesar de as temperaturas médias terem sido as mais baixas registadas no período do estudo, tendo descido de 15 a 9°C, durante esse período.

As concentrações da solução recolhida a 0,3 m diminuíram acentuadamente após 18 de Janeiro devido às precipitações ocorridas nessa nos dias anteriores, em que terá ocorrido

intensa lixiviação. Observou-se também que nesse ponto as concentrações de nitratos a 0,9 m foram sempre superiores ás obtidas a 0,3 m.

7.3.3.2 Evolução durante a época de primavera-verão de 2000

Os valores obtidos durante este período foram, como seria de esperar, bastante mais elevados que os do período anterior. Acentuaram-se as diferenças entre os 3 níveis, de acordo com as quantidades de fertilizante aplicadas.

Nas figuras 7.11 a 7.14 apresenta-se a evolução do teor de nitratos na solução do solo.

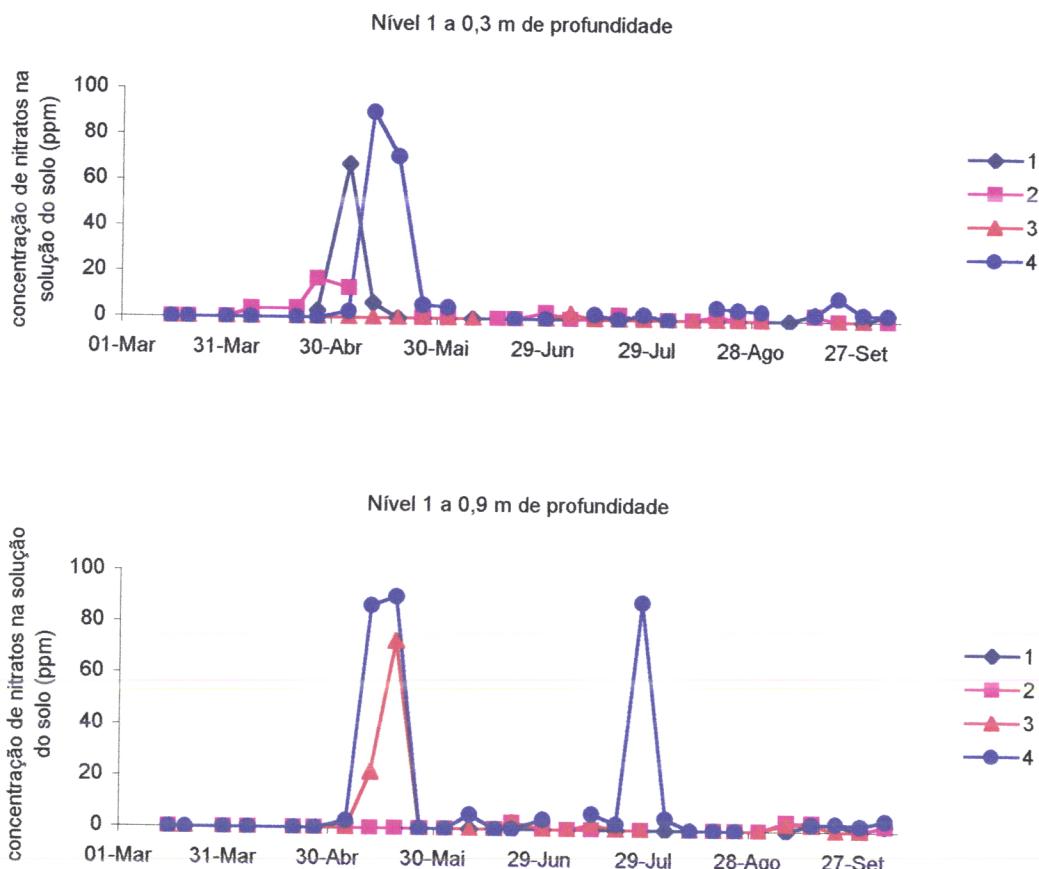


Figura 7.11 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de fertilregá, nos quatro pontos observados no nível 1.

Na figura 7.11 apresenta-se a evolução, no nível 1, dos teores de nitratos na solução do solo recolhida durante este período. Tanto a 0,3 m como a 0,9 m de profundidade, os valores

foram quase sempre inferiores a 50 mg/L, como era de esperar face às quantidades de N aplicados através da água de rega. Pode-se concluir também que houve intenso consumo pela planta, pois esses valores são inferiores às concentrações na água de rega que seriam as apresentadas no quadro 7.8.

Os valores mais elevados registaram-se durante o mês de Maio, provavelmente devido ao facto de se terem realizado apenas 13 fertirregas, na segunda quinzena, por ter chovido bastante nos primeiros dias desse mês, conforme se pode observar na figura 7.2, não se tendo regado nesse período, o que implicou maiores concentrações de N na água de rega nos eventos de fertirregua para garantir a aplicação das quantidades de N previstas para esse mês.

Pode-se concluir que as concentrações esperadas na solução do solo são inferiores às teoricamente existentes na água de rega nas fertirregas, conforme se pode inferir da comparação entre os valores das concentrações da solução do solo e os constantes no quadro 7.8, o que significa que as plantas os absorveram em quantidades elevadas, com excepção do mês de Maio em que terá havido uma menor absorção por parte das plantas, e em que normalmente há um decréscimo no desenvolvimento vegetativo que se terá reflectido na menor absorção dos nutrientes, e também em maiores quantidades de N-NO_3^- provenientes da nitrificação da componente amoniacal do nitrato de amónio, pois atendendo a que os citrinos absorvem também o N-NH_4^+ , uma diminuição no seu consumo reflectir-se-á num aumento da nitrificação do NH_4^+ .

A evolução das concentrações na solução do solo no nível 2, que se pode observar na figura 7.12, foi algo semelhante à que o nível 1 apresentou. Como se previa, os valores foram superiores aos do nível 1. Tendencialmente, os valores da solução recolhida a 0,9 m foram superiores aos da solução recolhida a 0,3 m, o que poderá ser explicado pelo maior consumo pelas plantas nas camadas de solo mais superficiais, devido à maior concentração de raízes activas e pelo humedecimento de camadas de solo abaixo da zona de maior concentração das raízes nos meses com maiores dotações de rega, nomeadamente de Julho a Setembro. No mês de Julho, correspondente a uma pausa no desenvolvimento vegetativo, terá havido maior acumulação de nitratos na solução recolhida a 0,9 m, como consequência de menor consumo pelas plantas.

Também foi no mês de Maio que se verificaram as maiores concentrações na solução recolhida a 0,3 m, pelas razões apontadas anteriormente para o nível 1. Pode-se observar que no mês de Junho houve um aumento na concentração da solução recolhida a 0,9 que terá resultado da lixiviação das quantidades de fertilizante aplicadas nos meses anteriores, do aumento das dotações de rega, de 7 L/dia/planta em Maio para 10,3 L/dia/planta em Junho, e

também do aumento das quantidades de N aplicadas e consequente aumento da concentração dos nitratos nas águas de rega.

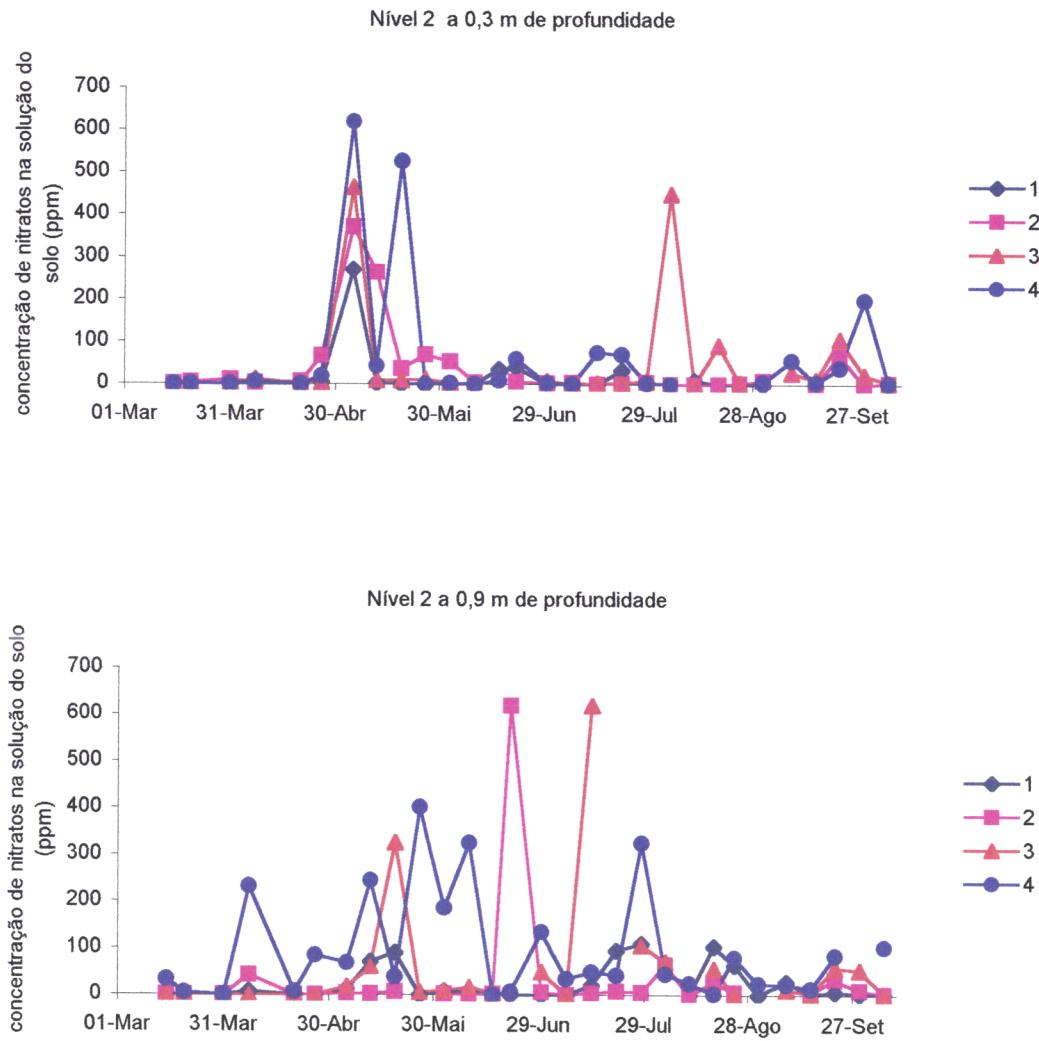


Figura 7.12 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de fertirregada, nos quatro pontos observados no nível 2.

Pode-se observar também que existem algumas variações acentuadas na evolução das concentrações. Essas descidas ocorreram principalmente nas amostras colhidas na segunda semana de cada mês e terão sido motivadas pela falta de aplicação de fertilizante azotado, para aplicar o fosfatado, e então, como as colheitas de amostras se realizaram semanalmente, as amostras de solução recolhidas na semana seguinte a essas aplicações apresentaram quase sempre menores concentrações de nitratos que as recolhidas durante as outras semanas. Essas acentuadas descidas nas

concentrações da solução recolhida a 0.9 m significam também que a essa profundidade poderá existir intenso movimento de água que transportará os solutos para as camadas subjacentes.

É interessante observar também que nos meses de Agosto e Setembro, período correspondente ao terceiro e mais importante surto de crescimento dos citrinos, as concentrações de nitratos na solução recolhida a 0.9 m de profundidade foram algo inferiores às registadas em Julho, mês em que há uma paragem no desenvolvimento vegetativo dos citrinos.

Na figura 7.14 apresentam-se os valores médios dos 4 pontos observados.

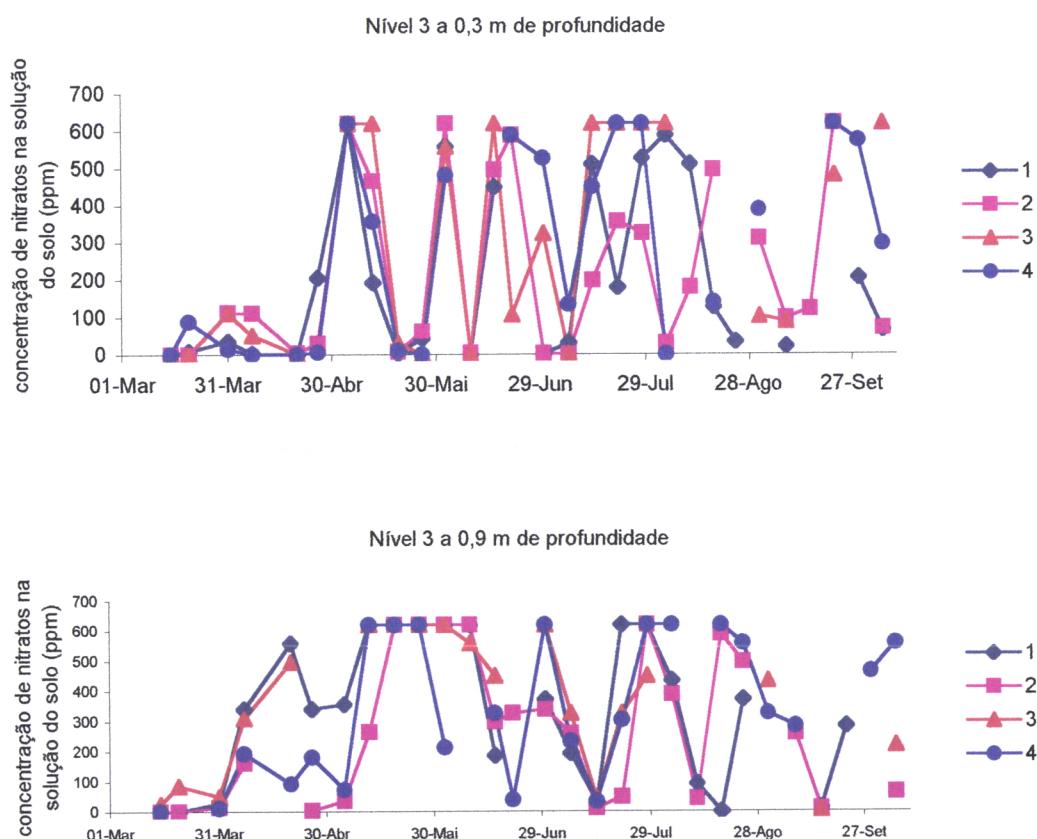


Figura 7.13 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período de fertirrigação, nos quatro pontos observados no nível 3.

A evolução registada no nível 3 é dada pela figura 7.13. Como se pode observar, as concentrações mantiveram-se sempre bastante elevadas, tendo em muitas situações atingido o valor máximo que o potenciómetro utilizado permite medir que é de 620 mg/L. As concentrações medidas foram assim, nessas situações, superiores às esperadas (quadro 7.8) o

que significará que terá havido intensa nitrificação do NH_4^+ proveniente do fertilizante devida às elevadas temperaturas da época e também ao sempre elevado teor de humidade do solo resultante das regas diárias, mas não o suficiente para poder ocorrer desnitrificação por se tratar de um solo de textura arenosa.

Devido às quantidades de N aplicadas neste nível de fertilização serem bastante superiores às aplicadas no nível 2, acentuaram-se mais as descidas consequentes da interrupção da fertilização azotada, conforme já se tinha referido para o caso da evolução registada no nível 2.

Pode-se também concluir que as quantidades de N aplicado foram excessivas em relação à capacidade de consumo pelas plantas.

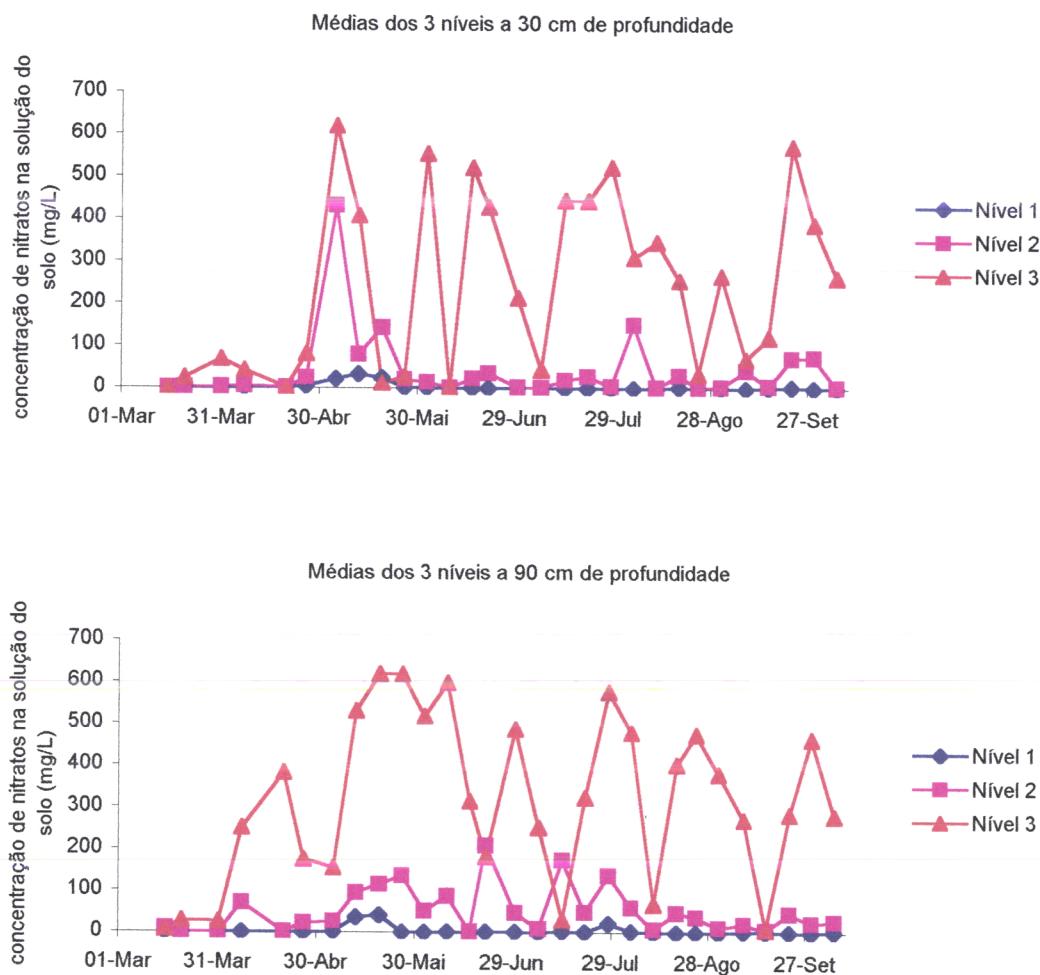


Figura 7.14 Evolução do teor de nitratos na solução do solo, durante o período da fertirregada, considerando os valores médios de cada nível de fertilização.

Na figura 7.14 pode-se observar os valores médios de cada nível, em que as maiores concentrações de nitratos observadas corresponderam sempre ao nível 3. Observa-se também que a 0,9 m de profundidade foi no mês de Maio que se verificaram as maiores concentrações por se terem realizado menos fertirregas que nos meses de verão o que implicou que as quantidades de N fossem menos distribuídas.

Os valores do nível 1 são os mais baixos, praticamente sempre inferiores a 50 mg/L.

Pode-se concluir que as plantas absorveram bastante do N aplicado no nível 2 nos meses de Agosto e Setembro. Atendendo a que se trata um nível de fertilização tido como racional, os valores médios registados nas concentrações dos nitratos na solução do solo, não muitas vezes superiores a 50 mg/L, são bastante aceitáveis, numa perspectiva ambiental.

Observa-se que as concentrações do nível 3 são tendencialmente bastante mais elevadas que o quádruplo dos valores do nível 2, principalmente nos meses de Julho a Agosto, o que significa que a taxa de aplicação do N excedeu largamente a capacidade de absorção das plantas.

Verifica-se também que os picos registados são pouco persistentes, dependentes das quantidades aplicadas, de acordo com o observado também por Alva e Paramasivam (1998), embora com rega por miniaspersão mas num solo semelhante, de textura arenosa e pobre em nutrientes.

7.3.4 Quantidades lixiviadas de N-NO₃⁻

As quantidades médias de N-NO₃⁻ lixiviadas a 0,9 m, na época de outono-inverno, por nível de fertilização, em Kg/ha, considerando apenas as correspondentes às superfícies humedecidas pelos gotejadores, foram as que se apresentam no quadro 7.13, no qual é possível observar a variabilidade espacial do solo:

Quadro 7.13
Lixiviação de N-NO₃⁻ no período de outono/inverno (Kg/ha)

Período	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
22/10 a 25/10/99	0,196	0,208	0,355	0,108	0,401	0,266
26/10 a 15/11/99	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
16/11 a 23/11/99	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24/11 a 29/11/99	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30/11 a 6/12/99	0,181	0,290	0,092	0,184	0,251	0,279
7/12 a 12/12/99	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13/12 a 19/12/99	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002
20 a 26/12/99	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
27/12/99 a 3/01/000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4/1 a 12/01/00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12/01 a 17/01/00	0,410	0,799	0,876	1,174	0,358	0,457
18/01 a 24/01/00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25/01 a 01/02/00	0,059	0,118	0,206	0,252	0,010	0,020
2/02 a 7/02/00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8/02 a 13/02/00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14/02 a 21/02/00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
22/02 a 1/03/00	0,000	0,000	0,004	0,008	0,000	0,000
Totais	0,848	1,289	1,533	1,383	1,021	0,664

As quantidades lixiviadas no período de fertirregga foram as que se apresentam no quadro 6.14, em que se pode observar também a média, o desvio padrão e as percentagens de N-NO₃⁻ lixiviadas, em relação ao N aplicado no referido período.

Quadro 7.14
Lixiviação do N-NO₃⁻ no período de fertirregga (Kg/ha)

Meses	Nível 1			Nível 2			Nível 3		
	Média	Desv. Pad.	% Lixiv.	Média	Desv. Pad.	% Lixiv.	Média	Desv. Pad.	% Lixiv.
Março	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,009	0,011	0,125
Abril	0,000	0,000	0,024	0,031	0,047	0,903	0,271	0,171	1,975
Maio	0,005	0,005	0,574	0,038	0,042	1,107	0,286	0,113	2,090
Junho	0,002	0,003	0,185	0,168	0,159	3,267	1,232	0,249	5,994
Julho	0,025	0,040	1,466	0,325	0,262	4,736	1,055	0,185	3,850
Agosto	0,001	0,002	0,054	0,083	0,025	1,217	1,043	0,400	3,805
Setembro	0,005	0,002	0,367	0,052	0,036	1,013	0,425	0,255	2,068
Totais	0,038	0,050	0,470	0,697	0,421	2,141	4,321	0,634	3,319

Na situação de outono/inverno, os baixos valores calculados para a lixiviação poderão ser explicados pelo facto de as observações só se terem iniciado após a ocorrência dos

primeiros eventos de precipitação os quais são responsáveis por grande parte da lixiviação neste tipo de solos (Wang e Alva, 1996). No caso em apreço, há a referir que entre 19 de Setembro e 22 de Outubro a precipitação registada foi de 94,4 mm o que poderá, eventualmente, ter provocado lixiviação das quantidades de N-NO₃⁻, provenientes das últimas fertirregas que poderiam estar no solo em quantidades algo significativas.

Para os baixos valores obtidos para a lixiviação, principalmente nos níveis 1 e 2, que se estimaram em 0.47 % e 2.1 % dos totais aplicados, respectivamente, no período em que se realizou a fertirregada, e apesar de as regas não terem sido optimizadas, terá contribuído a elevada frequência com que se realizaram as fertirregas. Willis *et al.* (1991) também concluíram que, para uma mesma dotação de N, há menor lixiviação de N-NO₃⁻ quando a frequência de aplicação de N é maior.

Como se previa, foi no nível mais elevado de fertilização que se registaram as maiores quantidades lixiviadas no período de fertirregada, cerca de 4.3 % do total aplicado, como consequência directa das maiores quantidades aplicadas, podendo tais valores ser ainda mais elevados devido ao facto de o potenciómetro utilizado só permitir a determinação de valores até às 620 mg/L de NO₃⁻.

Os valores correspondem também aos obtidos por Syvertsen e Smith (1996), em toranjeiras “Redblush” com 5 e 6 anos, com rega por minaspersão, plantadas em lisímetros, obtendo lixiviações totais anuais, de cerca de 2 a 9% das quantidades aplicadas na fertilização que foi da ordem das 80 a 870 gramas por planta anualmente.

No entanto ocorreram perdas as quais confirmam que nos pomares de citrinos instalados em solos arenosos serão praticamente inevitáveis as pequenas perdas de N-NO₃⁻ (Dasberg, 1987, citado por Syversten e Smith, 1996).

7.4 Análise estatística

Realizou-se uma análise estatística mais detalhada somente para a evolução das concentrações de nitratos na solução do solo registadas durante a época da fertirregada, atendendo a que não houve diferenças visíveis nos dados correspondentes à situação de outono-inverno e a que as lixiviações calculadas para essa época foram em função das medições do teor de humidade apenas num ponto do solo.

Devido à natureza dos dados, com alguma variabilidade e atendendo a que nem sempre foi possível recolher solução de todas as cápsulas de sucção, optou-se por regularizá-los,

considerando os totais acumulados ao longo do tempo, em cada nível e em cada profundidade.

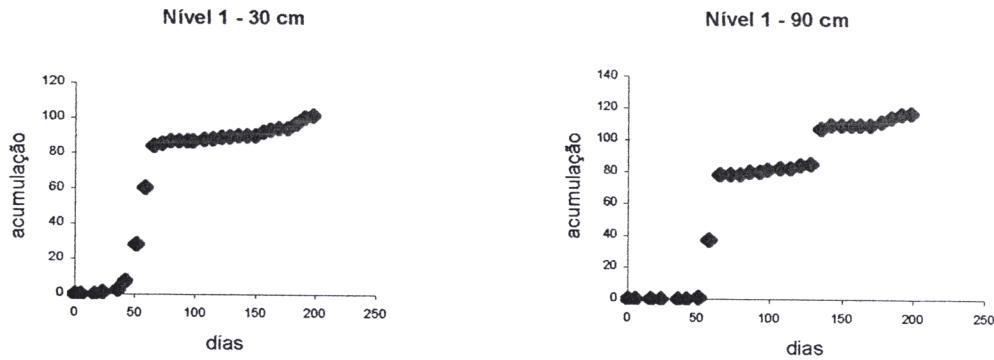


Figura 7.15. Curvas de acumulação de nitratos no nível 1

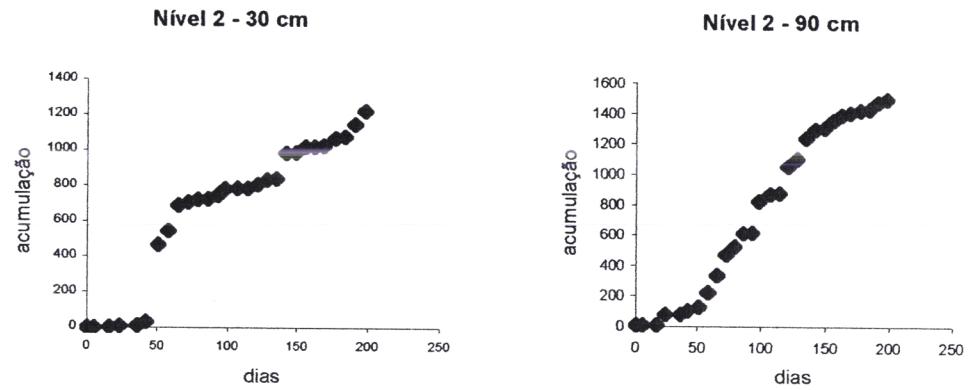


Figura 7.16. Curvas de acumulação de nitratos no nível 2

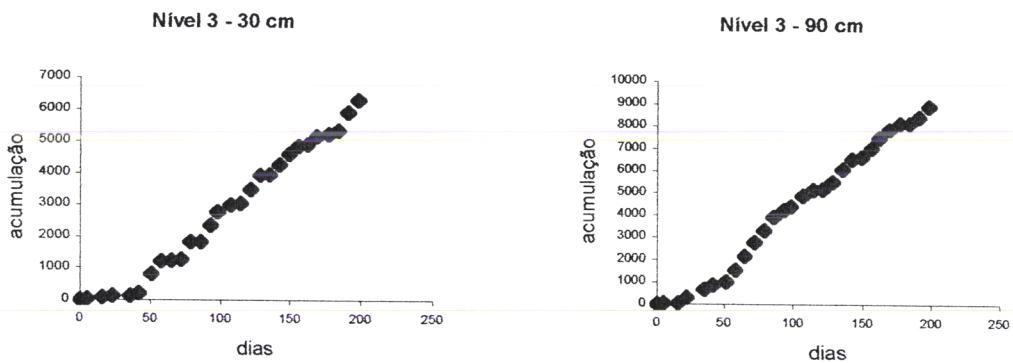


Figura 7.17. Curvas de acumulação de nitratos no nível 3

Da observação dos gráficos nota-se um “salto” a partir do 58º dia, correspondente a 26 de Abril, passando a partir daí a haver um andamento aproximadamente linear. A forma escolhida para descrever esse comportamento foi o ajustamento de regressões lineares de forma:

$$y = a + b(x - 58) \quad (7.3)$$

Em que a representa o montante desse “salto” e b a taxa de acumulação subsequente. No quadro 7.15, apresentam-se os valores desses parâmetros para cada profundidade de cada nível.

Quadro 7.15

Parâmetros a e b das equações de acumulação de nitratos

Nível	Parâmetros	Profundidade	
		30 cm	90 cm
1	a	78,5	64,26
	b	0,15	0,42
	a	604,3	368,35
2	b	3,99	6,29
	a	1088,15	2187,85
	b	36,74	49,47

Esse comportamento pode ser representado também graficamente, através das rectas resultantes da regressão linear das curvas dos totais de nitratos acumulados de regressão, obtidas para cada nível e para cada profundidade:

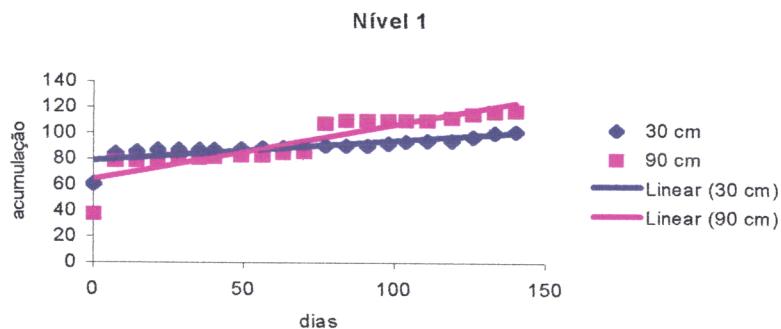


Figura 7.18 Rectas resultantes da regressão linear das curvas dos totais de nitratos acumulados no nível 1

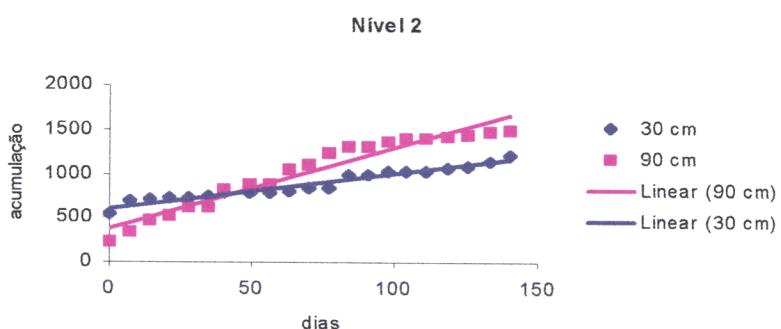


Figura 7.19 Rectas resultantes da regressão linear das curvas dos totais de nitratos acumulados no nível 2

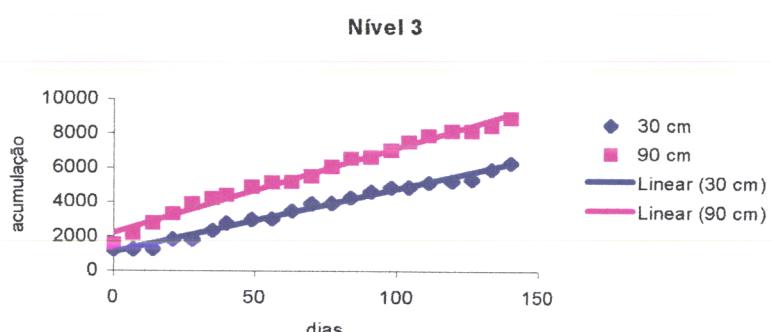


Figura 7.20 Rectas resultantes da regressão linear das curvas dos totais de nitratos acumulados no nível 3

Nas figuras 7.18 a 7.20, pode-se observar que com aumento das quantidades de N aplicadas e com o aumento das dotações de rega, desde o início das fertirregas até ao mês de Agosto, conforme se apresenta nos quadros 7.5 e 7.7, há maior acumulação nas curvas correspondentes à solução recolhida a 0.9 m de profundidade, nos três níveis.

Observam-se também descontinuidades nas curvas que correspondem aos períodos em que a fertirrega com azoto foi suspensa, para se aplicar o fertilizante fosfatado ou os pesticidas, aspecto já também referido anteriormente.

É interessante observar a evolução dos parâmetros a e b , nos três níveis de fertilização:

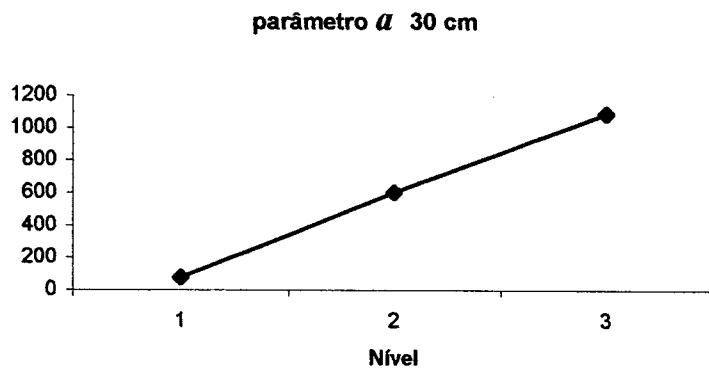


Figura 7.21 Variação do parâmetro a da equação de regressão para 0,3 m de profundidade, nos 3 níveis de fertilização

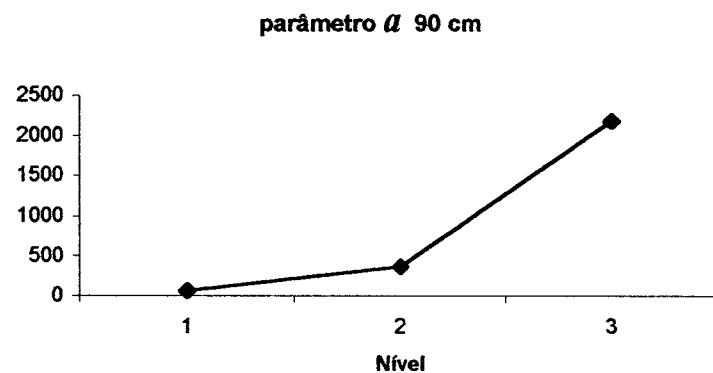


Figura 7.22 Variação do parâmetro α da equação de regressão para 0,9 m de profundidade, nos 3 níveis de fertilização

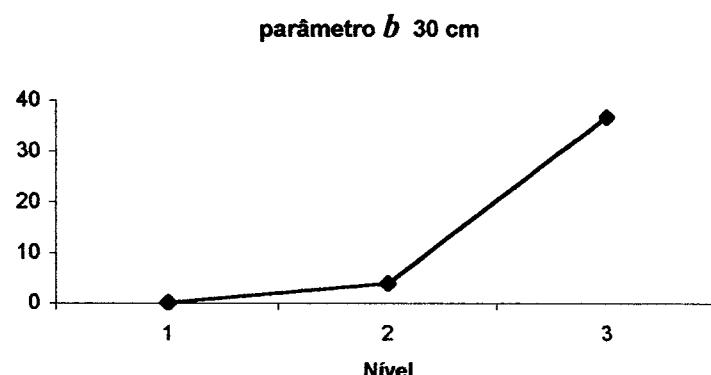


Figura 7.23 Variação do parâmetro b da equação de regressão para 0,3 m de profundidade, nos 3 níveis de fertilização

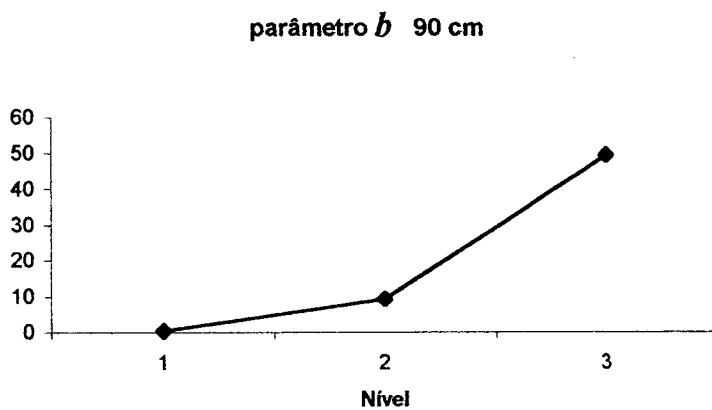


Figura 7.24 Variação do parâmetro b da equação de regressão para 0,9 m de profundidade, nos 3 níveis de fertilização.

Nota-se a maior diferença nos parâmetros b do segundo para o terceiro nível. Assim, a acumulação de nitratos na solução do solo faz-se sobretudo quando o nível da adubação é superior ao segundo nível. No mês de Abril de 2000 foi aplicado mais azoto (24 g/planta) no nível 3 que o total anual aplicado no nível 1 (15 g/planta), correspondendo essa quantidade de azoto a 40% do total aplicado na época no nível 2 (60 g/planta), conforme se pode observar no quadro 7.7.

7.4.1 Análise de erros

Atendendo a que nem sempre foi possível recolher amostras de todas as cápsulas de sucção instaladas, realizou-se uma análise do erro associado a essa deficiência. Para isso verificou-se se a recolha das amostras que faltaram teriam diminuído significativamente o erro padrão. Utilizou-se assim uma metodologia que permitisse determinar o número de amostras necessárias para que o erro padrão calculado diminuisse, para um determinado intervalo de confiança.

Para isso utilizou-se a expressão:

$$n \geq \frac{u^2_{1-\alpha/2} \sigma^2}{d^2} \quad (7.4)$$

em que n é o número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão, $u^2_{1-\alpha}$ é um valor retirado das tabelas de distribuição normal reduzida, associado ao intervalo de confiança considerado, σ^2 é a variância e d é o erro padrão.

Nos quadros 7.16 a 7.18 apresentam-se o número mínimo de amostras que permitiria reduzir o erro padrão, para um intervalo de confiança de 95%. Nos mesmos quadros podem-se observar as médias, desvio padrão e erro padrão para cada nível, para cada profundidade, em cada data de recolha de solução do solo. Pode-se observar que o número de amostras que permitiria reduzir o erro padrão é muito superior às quatro amostras recolhidas. Esta análise atesta a grande variabilidade do solo, a nível das características hidráulicas, químicas, físicas, biológicas, etc.

Outra forma de abordar a situação será o raciocínio inverso, ou seja, será determinar, por tentativas, o intervalo de confiança correspondente à redução do erro padrão através do aumento do número de amostras. Através da mesma expressão, e escolhendo-se o intervalo de confiança por tentativas e utilizando os respectivos valores das tabelas de distribuição normal reduzida, concluiu-se que o aumento do número de amostras permitiria passar de um intervalo de confiança de 60% para um intervalo de confiança a 70%, reduzindo o erro padrão e mantendo-se os outros parâmetros. Nos quadros 7.19 e 7.20 pode-se observar o exposto anteriormente.

Quadro 7.16

Número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão
no Nível 1, para um intervalo de confiança de 95%

Datas de recolha	30 cm					90 cm				
	Média	n	DP	EP	n'	média	n	DP	EP	n'
15-Mar	0,00	4	0,00	0,00	-	0,00	4	0,00	0,00	-
20-Mar	0,00	4	0,00	0,00	-	0,00	3	0,00	0,00	-
31-Mar	0,00	4	0,00	0,00	-	0,00	4	0,00	0,00	-
07-Abr	1,20	3	2,13	1,23	10,83	0,00	3	0,00	0,00	-
20-Abr	1,30	3	2,25	1,30	10,83	0,00	4	0,00	0,00	-
26-Abr	5,00	4	8,17	4,09	14,44	0,00	4	0,00	0,00	-
05-Mai	20,90	4	31,48	15,74	14,44	1,30	4	1,48	0,74	14,44
12-Mai	32,20	3	50,31	29,04	10,83	36,20	3	45,08	26,03	10,83
19-Mai	23,60	3	40,88	23,60	10,83	40,80	4	47,61	23,80	14,44
26-Mai	1,50	4	2,95	1,47	14,44	0,00	3	0,00	0,00	-
02-Jun	1,30	4	2,50	1,25	14,44	0,00	4	0,00	0,00	-
09-Jun	0,00	2	0,00	0,00	-	1,90	3	3,23	1,87	10,83
16-Jun	0,00	2	0,00	0,00	-	0,00	4	0,00	0,00	-
21-Jun	0,00	4	0,00	0,00	-	1,30	4	1,47	0,74	14,44
30-Jun	0,70	4	1,35	0,68	14,44	1,00	4	1,95	0,97	14,44
07-Jul	0,80	3	1,45	0,84	10,83	0,00	3	0,00	0,00	-
14-Jul	0,60	4	1,15	0,58	14,44	2,10	4	2,92	1,46	14,44
21-Jul	0,50	4	1,00	0,50	14,44	0,70	3	1,26	0,73	10,83
28-Jul	0,60	4	1,20	0,60	14,44	22,10	4	44,25	22,13	14,44
04-Ago	0,00	4	0,00	0,00	-	2,30	2	3,18	2,25	7,22
11-Ago	0,00	3	0,00	0,00	-	0,00	3	0,00	0,00	-
18-Ago	2,00	4	2,69	1,34	14,44	0,00	4	0,00	0,00	-
24-Ago	1,20	4	2,35	1,18	14,44	0,00	4	0,00	0,00	-
31-Ago	1,00	4	1,95	0,97	14,44	0,00	2	0,00	0,00	-
08-Set	0,00	1	-	-	-	2,10	3	1,87	1,08	10,83
15-Set	2,70	3	0,39	0,22	10,83	2,90	4	0,32	0,16	14,44
22-Set	3,30	3	5,77	3,33	10,83	1,90	3	1,66	0,96	10,83
29-Set	1,00	3	1,73	1,00	10,83	0,60	4	1,15	0,58	14,44

n número de amostras colhidas

DP é o desvio padrão

EP o erro padrão

n' o número mínimo de amostras para reduzir o erro padrão.

Quadro 7.17
Número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão
no Nível 2, para um intervalo de confiança de 95%

Datas de recolha	30 cm					90 cm				
	Média	n	DP	EP	n'	Média	n	DP	EP	n'
15-Mar	0,00	4	0,00	0,00	-	8,40	4	16,75	8,38	14,44
20-Mar	1,00	4	1,95	0,97	14,44	1,10	4	2,15	1,08	14,44
31-Mar	2,50	4	5,00	2,50	14,44	0,00	4	0,00	0,00	-
07-Abr	5,10	4	5,26	2,63	14,44	70,10	4	109,49	54,75	14,44
20-Abr	1,50	4	3,05	1,52	14,44	1,90	4	3,70	1,85	14,44
26-Abr	23,70	4	29,92	14,96	14,44	21,20	4	42,45	21,22	14,44
05-Mai	432,00	4	148,27	74,14	14,44	25,70	4	29,53	14,77	14,44
12-Mai	79,80	4	124,44	62,22	14,44	94,60	4	104,70	52,35	14,44
19-Mai	143,30	4	256,27	128,14	14,44	115,30	4	144,34	72,17	14,44
26-Mai	20,00	4	33,13	16,57	14,44	136,10	3	231,13	133,44	10,83
02-Jun	14,40	4	25,59	12,80	14,44	51,40	4	90,10	45,05	14,44
09-Jun	1,20	3	2,13	1,23	10,83	86,80	4	159,31	79,65	14,44
16-Jun	22,30	2	19,02	13,45	7,22	2,50	4	1,79	0,89	14,44
21-Jun	35,30	3	26,40	15,24	10,83	209,00	3	356,01	205,54	10,83
30-Jun	3,10	4	2,94	1,47	14,44	47,50	4	62,05	31,03	14,44
07-Jul	0,90	4	1,85	0,93	14,44	8,50	4	17,05	8,52	14,44
14-Jul	19,20	4	36,83	18,42	14,44	173,60	4	298,19	149,09	14,44
21-Jul	27,50	4	31,98	15,99	14,44	48,60	3	43,98	25,39	10,83
28-Jul	4,80	3	2,46	1,42	10,83	136,90	4	134,59	67,29	14,44
04-Ago	149,80	3	259,52	149,83	10,83	60,40	3	13,63	7,87	10,83
11-Ago	2,80	3	4,91	2,83	10,83	8,20	3	14,20	8,20	10,83
18-Ago	30,70	3	53,12	30,67	10,83	47,50	4	43,81	21,90	14,44
24-Ago	1,90	3	1,82	1,05	10,83	37,40	4	40,24	20,12	14,44
31-Ago	4,30	3	4,25	2,46	10,83	12,10	2	17,04	12,05	7,22
08-Set	42,90	2	20,58	14,55	7,22	21,00	3	8,42	4,86	10,83
15-Set	6,50	3	4,52	2,61	10,83	6,00	4	5,00	2,50	14,44
22-Set	71,90	3	34,64	20,00	10,83	45,80	4	33,64	16,82	14,44
29-Set	74,00	3	109,32	63,12	10,83	22,50	3	27,78	16,04	10,83

n número de amostras colhidas

DP é o desvio padrão

EP o erro padrão

n' o número mínimo de amostras para reduzir o erro padrão.

Quadro 7.18
Número de amostras necessárias para reduzir o erro padrão
no Nível 3, para um intervalo de confiança de 95%

Datas de recolha	30 cm					90 cm				
	Média	n	DP	EP	n'	média	n	DP	EP	n'
15-Mar	0,00	4	0,00	0,00	-	6,15	4	12,30	6,15	14,44
20-Mar	24,40	4	42,95	21,47	14,44	28,30	3	49,07	28,33	10,83
31-Mar	68,80	4	50,91	25,46	14,44	25,00	4	17,67	8,84	14,44
07-Abr	41,40	4	52,23	26,12	14,44	251,10	4	87,82	43,91	14,44
20-Abr	0,90	4	1,80	0,90	14,44	382,00	3	253,05	146,10	10,83
26-Abr	80,60	3	109,26	63,08	10,83	175,00	3	168,61	97,34	10,83
05-Mai	620,00	4	0,00	0,00	-	154,90	3	175,53	101,34	10,83
12-Mai	408,60	4	179,88	89,94	14,44	531,10	4	177,75	88,88	14,44
19-Mai	12,30	4	12,11	6,06	14,44	620,00	3	0,00	0,00	-
26-Mai	26,40	4	31,36	15,68	14,44	620,00	4	0,00	0,00	-
02-Jun	554,10	4	57,13	28,56	14,44	518,10	4	203,75	101,88	14,44
09-Jun	1,50	3	2,60	1,50	10,83	599,30	3	35,80	20,67	10,83
16-Jun	521,80	3	88,14	50,89	10,83	314,60	4	108,07	54,03	14,44
21-Jun	428,60	3	277,76	160,37	10,83	182,20	2	202,73	143,35	7,22
30-Jun	214,00	4	258,55	129,28	14,44	487,50	4	153,66	76,83	14,44
07-Jul	42,70	4	62,65	31,32	14,44	252,10	4	55,74	27,87	14,44
14-Jul	445,10	4	178,27	89,13	14,44	30,00	4	13,41	6,71	14,44
21-Jul	444,10	4	215,49	107,74	14,44	324,30	4	233,92	116,96	14,44
28-Jul	22,10	4	44,25	22,13	14,44	577,40	4	85,25	42,63	14,44
04-Ago	309,60	4	340,97	170,48	14,44	480,50	3	123,03	71,03	10,83
11-Ago	345,80	2	234,41	165,75	7,22	67,70	2	34,37	24,30	7,22
18-Ago	255,00	3	208,81	120,56	10,83	403,00	3	349,35	201,70	10,83
24-Ago	34,10	1	-	-	-	475,30	3	94,71	54,68	10,83
31-Ago	266,70	3	147,30	85,05	10,83	379,80	2	76,72	54,25	7,22
08-Set	68,90	3	41,80	24,13	10,83	271,00	2	18,38	13,00	7,22
15-Set	121,50	1	-	-	-	8,50	3	3,08	1,78	10,83
22-Set	573,50	3	80,54	46,50	10,83	284,00	1	-	-	-
29-Set	389,80	2	259,86	183,75	7,22	465,00	1	-	-	-

n número de amostras colhidas

DP é o desvio padrão

EP o erro padrão

n' o número mínimo de amostras para reduzir o erro padrão.

Quadro 7.19
Redução do erro num Intervalo de Confiança de 60%

Datas de Recolha	Nível 1						Nível 2						Nível 3					
	Média	30 cm n	n'	Média	90 cm n	n'	Média	30 cm n	n'	Média	90 cm n	n'	Média	30 cm n	n'	Média	90 cm n	n'
15-Mar	0,00	4	-	0,00	4	-	0,00	4	-	8,40	4	2,89	0,00	4	-	6,15	4	2,89
20-Mar	0,00	4	-	0,00	3	-	1,00	4	2,89	1,10	4	2,89	24,40	4	2,89	28,30	3	2,17
31-Mar	0,00	4	-	0,00	4	-	2,50	4	2,89	0,00	4	-	68,80	4	2,89	25,00	4	2,89
07-Abr	1,20	3	2,17	0,00	3	-	5,10	4	2,89	70,10	4	2,89	41,40	4	2,89	251,10	4	2,89
20-Abr	1,30	3	2,17	0,00	4	-	1,50	4	2,89	1,90	4	2,89	2,89	4	2,89	382,00	3	2,17
26-Abr	5,00	4	2,89	0,00	4	-	23,70	4	2,89	21,20	4	2,89	80,60	3	2,17	175,00	3	2,17
05-Mai	20,90	4	2,89	1,30	4	2,89	432,00	4	2,89	25,70	4	2,89	620,00	4	-	154,90	3	2,17
12-Mai	32,20	3	2,17	36,20	3	2,17	79,80	4	2,89	94,60	4	2,89	408,60	4	2,89	531,10	4	2,89
19-Mai	23,60	3	2,17	40,80	4	2,89	143,30	4	2,89	115,30	4	2,89	12,30	4	2,89	620,00	3	-
26-Mai	1,50	4	2,89	0,00	3	-	20,00	4	2,89	136,10	3	2,17	26,40	4	2,89	620,00	4	-
02-Jun	1,30	4	2,89	0,00	4	-	14,40	4	2,89	51,40	4	2,89	554,10	4	2,89	518,10	4	2,89
09-Jun	0,00	2	-	1,90	3	2,17	1,20	3	2,17	86,80	4	2,89	1,50	3	2,17	599,30	3	2,17
16-Jun	0,00	2	-	0,00	4	-	22,30	2	1,45	2,50	4	2,89	521,80	3	2,17	314,60	4	2,89
21-Jun	0,00	4	-	1,30	4	2,89	35,30	3	2,17	209,00	3	2,17	428,60	3	2,17	182,20	2	1,45
30-Jun	0,70	4	2,89	1,00	4	2,89	3,10	4	2,89	47,50	4	2,89	214,00	4	2,89	487,50	4	2,89
07-Jul	0,80	3	2,17	0,00	3	0,90	4	2,89	8,50	4	2,89	42,70	4	2,89	252,10	4	2,89	
14-Jul	0,60	4	2,89	2,10	4	2,89	19,20	4	2,89	173,60	4	2,89	445,10	4	2,89	30,00	4	2,89
21-Jul	0,50	4	2,89	0,70	3	2,17	27,50	4	2,89	48,60	3	2,17	444,10	4	2,89	324,30	4	2,89
28-Jul	0,60	4	2,89	22,10	4	2,89	4,80	3	2,17	136,90	4	2,89	22,10	4	2,89	577,40	4	2,89
04-Ago	0,00	4	-	2,30	2	1,45	149,80	3	2,17	60,40	3	2,17	309,60	4	2,89	480,50	3	2,17
11-Ago	0,00	3	-	0,00	3	-	2,80	3	2,17	8,20	3	2,17	345,80	2	1,45	67,70	2	1,45
18-Ago	2,00	4	2,89	0,00	4	-	30,70	3	2,17	47,50	4	2,89	255,00	3	2,17	403,00	3	2,17
24-Ago	1,20	4	2,89	0,00	4	-	1,90	3	2,17	37,40	4	2,89	34,10	1	-	475,30	3	2,17
31-Ago	1,00	4	2,89	0,00	2	-	4,30	3	2,17	12,10	2	1,45	266,70	3	2,17	379,80	2	1,45
08-Set	0,00	1	-	2,10	3	2,17	42,90	2	1,45	21,00	3	2,17	68,90	3	2,17	271,00	2	1,45
15-Set	2,70	3	2,17	2,90	4	2,89	6,50	3	2,17	6,00	4	2,89	121,50	1	-	8,50	3	2,17
22-Set	3,30	3	2,17	1,90	3	2,17	71,90	3	2,17	45,80	4	2,89	573,50	3	2,17	284,00	1	-
29-Set	1,00	3	2,17	0,60	4	2,89	74,00	3	2,17	22,50	3	2,17	389,80	2	1,45	465,00	1	-

Quadro 7.20
Redução do erro num Intervalo de Confiança de 70%

Datas de Recolha	Nível 1				Nível 2				Nível 3			
	Média	30 cm n	90 cm n'	Média	30 cm n	90 cm N'	média	30 cm n	90 cm n'	média	30 cm n	90 cm n'
15-Mar	0,00	4	-	0,00	4	-	0,00	4	4,33	0,00	4	-
20-Mar	0,00	4	-	0,00	3	-	1,00	4	4,33	1,10	4	4,33
31-Mar	0,00	4	-	0,00	4	-	2,50	4	4,33	0,00	4	25,00
07-Abr	1,20	3	3,24	0,00	3	-	5,10	4	4,33	70,10	4	4,33
20-Abr	1,30	3	3,24	0,00	4	-	1,50	4	4,33	1,90	4	4,33
26-Abr	5,00	4	4,33	0,00	4	-	23,70	4	4,33	21,20	4	4,33
05-Mai	20,90	4	4,33	1,30	4	4,33	432,00	4	4,33	25,70	4	4,33
12-Mai	32,20	3	3,24	36,20	3	3,24	79,80	4	4,33	94,60	4	4,33
19-Mai	23,60	3	3,24	40,80	4	4,33	143,30	4	4,33	115,30	4	4,33
26-Mai	1,50	4	4,33	0,00	3	-	20,00	4	4,33	136,10	3	3,24
02-Jun	1,30	4	4,33	0,00	4	-	14,40	4	4,33	51,40	4	4,33
09-Jun	0,00	2	-	1,90	3	3,24	1,20	3	3,24	86,80	4	4,33
16-Jun	0,00	2	-	0,00	4	-	22,30	2	2,50	4,33	4,33	620,00
21-Jun	0,00	4	-	1,30	4	4,33	35,30	3	3,24	3,24	3,24	-
30-Jun	0,70	4	4,33	1,00	4	4,33	3,10	4	4,33	1,50	3	3,24
07-Jul	0,80	3	3,24	0,00	3	-	0,90	4	4,33	2,16	2,16	-
14-Jul	0,60	4	4,33	2,10	4	4,33	19,20	4	4,33	173,60	4	4,33
21-Jul	0,50	4	4,33	0,70	3	3,24	27,50	4	4,33	48,60	3	4,33
28-Jul	0,60	4	4,33	22,10	4	4,33	4,80	3	3,24	47,50	4	4,33
04-Ago	0,00	4	-	2,30	2	2,16	149,80	3	3,24	209,00	3	3,24
11-Ago	0,00	3	-	0,00	3	-	2,80	3	3,24	428,60	3	3,24
18-Ago	2,00	4	4,33	0,00	4	-	30,70	3	3,24	42,70	4	4,33
24-Ago	1,20	4	4,33	0,00	4	-	1,90	3	3,24	4,33	4,33	-
31-Ago	1,00	4	4,33	0,00	2	-	4,30	3	3,24	8,20	3	4,33
08-Set	0,00	1	-	2,10	3	3,24	47,50	4	4,33	13,60	4	4,33
15-Set	2,70	3	3,24	2,90	4	4,33	6,50	2	2,16	60,40	3	3,24
22-Set	3,30	3	3,24	1,90	3	3,24	42,90	2	2,16	21,00	3	3,24
29-Set	1,00	3	3,24	4,33	4,33	74,00	3	3,24	32,40	121,50	1	3,24

7.6 Conclusões

Os resultados obtidos nos trabalhos de campo confirmam que a fertirrega de alta frequência, através de sistemas de regagota-a-gota, é um método bastante eficiente para a aplicação dos fertilizantes azotados, permitindo a redução das perdas por lixiviação do N-NO_3^- em solos de textura arenosa os quais respondem rapidamente às entradas de água, devido à sua elevada condutividade hidráulica.

No nível 1, correspondente a uma fertilização azotada deficitária, a lixiviação foi de cerca de 0,47 % das quantidades totais aplicadas, tendo as concentrações de nitratos na solução do solo sido quase sempre inferiores a 50 mg/L, abaixo dos valores máximos admissíveis na nossa legislação, para águas potáveis. Se houvesse uma lixiviação permanente não seria a solução do solo que iria contribuir para a ultrapassagem desse valores de referência.

No nível 2, tido como um nível adequado para plantas de citrinos neste estado de desenvolvimento, as perdas de N por lixiviação do N-NO_3^- foram muito reduzidas, cerca de 2,1% das quantidades totais de N aplicadas durante a época da fertirrega, em que as maiores quantidades lixiviadas ocorreram nos meses de maiores dotações de N e de rega, de Junho a Julho. As concentrações do NO_3^- na solução do solo, foram também muitas vezes inferiores a 50 mg/L, tendo-se registado os valores de concentração mais elevados nos meses de Maio a Julho.

O nível 3 de fertilização revelou-se excessivo para a capacidade de absorção das plantas, traduzindo-se por valores muito altos na concentração da solução do solo, frequentemente superiores a 600 mg/L.

No entanto, a fertirrega com sistemas de rega localizada de alta frequência para ser mais eficaz tem que ser cuidadosamente gerida. Para além da boa gestão da fertilização é também fundamental uma boa gestão das regas. Numa situação semelhante à deste estudo, num solo bastante arenoso, a boa gestão da rega tem importância acrescida, sendo importante evitar as perdas por percolação profunda.

Nos solos de texturas semelhantes à do em que decorreu este trabalho será aconselhável que se insira o número suficiente de gotejadores que possa garantir que as dotações de rega sejam aplicadas sem que ocorram perdas por percolação profunda e a lixiviação de nutrientes associada. O recurso a várias regas diárias, para diminuir o tempo de rega e a profundidade alcançada pela água de rega, pode ser uma solução vantajosa para

estas situações, e em que actualmente com os programadores de rega existentes no mercado é fácil e economicamente exequível. Também a utilização de gotejadores de maiores débitos, da ordem dos 8 L/h, os mais frequentes no mercado, poderão constituir uma boa alternativa.

A baixa persistência dos picos das concentrações de nitratos, observada após as suspensões pontuais das fertilizações azotadas, contribui para que se possa gerir a fertilização de modo a que no período do outono-inverno não existam no solo quantidades elevadas de N-NO_3^- disponíveis para serem lixiviadas.

Deverão ser realizados trabalhos semelhantes em solos de características hidráulicas diferentes, em que se prevêem delimitações de novas zonas vulneráveis, principalmente nos solos das formações do jurássico do barrocal. Nesses trabalhos deverão utilizar-se árvores em diferentes estados de desenvolvimento para um maior conhecimento sobre as relações entre as dotações de fertilizantes, dotações de rega, tipos de fertilizantes, cultivares, características dos solos, débitos de gotejadores utilizados, gestão da rega, etc.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar das más consequências das incorrectas práticas agrícolas do passado que se terão reflectido na degradação da qualidade das águas subterrâneas, é de crer que no futuro não haja agravamento da situação, esperando-se uma evolução positiva, embora a recuperação dos aquíferos degradados seja um processo extremamente lento.

Para essa evolução contribuirá decisivamente uma melhor preparação técnica dos agricultores e dos próprios técnicos, através de campanhas de sensibilização e de adequadas acções de formação técnica.

Os novos programas de financiamento ao sector agrícola, direcionados para a preservação do ambiente e os incentivos à “produção integrada” e à “agricultura biológica” contidos nas “Medidas Agro-Ambientais” do programa RURIS terão também um papel bastante positivo.

Será necessário, também, uma correcta caracterização das zonas de agricultura intensiva de regadio a nível das áreas ocupadas pelas culturas e sobre as práticas e técnicas culturais, principalmente a rega e a fertilização, e sobre os solos, principalmente as suas características hidráulicas e químicas.

A redução da poluição por nitratos resultante da actividade agrícola, estará sempre dependente de uma boa gestão do azoto e da rega.

A boa gestão do azoto passará pela aplicação do azoto nas alturas adequadas ao longo do ciclo cultural, com os fraccionamentos adequados. Será importante um maior conhecimento sobre as necessidades e respectivas épocas de nutrientes pelas diferentes cultivares por forma a que a fertilização possa ser mais racional.

Para uma boa gestão das regas, será importante o correcto planeamento das regas, a nível das dotações e frequências, e a opção por equipamentos aplicadores de qualidade, com boa uniformidade de débito e autolimpantes para prevenção dos entupimentos. No caso da regagota-a-gota terá bastante interesse estudar o movimento da água no solo resultante dos diferentes débitos dos gotejadores existentes no mercado e de diferentes tempos de rega, para

que possa haver melhores critérios de escolha dos sistemas mais adequados para cada situação.

Será importante, assim, a realização de um trabalho de monitorização, nas situações mais representativas da região, sobre o movimento dos nitratos ao longo do perfil do solo, recorrendo aos equipamentos de monitorização como as novas sondas TDR.

A divulgação das novas tecnologias para a monitorização da aplicação de água e dos nutrientes, associadas às boas práticas agrícolas, deverá ser também uma prioridade que poderá passar pela instalação de campos de demonstração em explorações de agricultores, para divulgação junto de técnicos e agricultores, poderão dar também um importante contributo.

Será também de todo o interesse que se desenvolvam modelos informáticos apropriados para a regagota-a-gota, e para culturas fruteiras, os quais poderão contribuir para a previsão, de uma forma mais expedita, da lixiviação que se esperará numa determinada situação, sendo para tal necessário um conhecimento das características dos solos e das práticas agrícolas utilizadas pelos agricultores. Os modelos existentes, como NLEAP, RZWQM e LEACHM, segundo os próprios autores, não serão os mais aconselháveis para a regagota-a-gota, devido às características tridimensionais da infiltração quando a água é aplicada no solo por este método de rega, por terem sido concebidos essencialmente para a infiltração unidimensional vertical e/ou com total humedecimento do solo, pelo que a concepção de modelos adequados será de grande importância, principalmente para os solos de texturas mais finas que a do solo em que se realizaram estes trabalhos de campo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Alexander, L.; Skaggs, R.W. (1986) – Predicting unsaturated hydraulic conductivity from the soil water characteristic. *Transactions of the ASAE* **29** (1): 176-184.
- Al –Jamal, M.S.; Sammis, T.W.; Jones, T. (1996) – Nitrogen and chloride concentration in deep soil cores related to fertilization. *Agricultural Water Management* **34**: 1-16
- Alva, A. K. ; Prakash, O.; Fares, A; Hornsby, A. G . (1997) – Distribution of rainfall and soil moisture content in the soil profile under citrus tree canopy and at the dripline. *Irrigation Science* **18**: 109-115.
- Alva, A.K; Paramasivam, S. (1998) – Nitrogen management for high yield and quality of citrus in sandy soils. *Soil Science Society America Journal* **61**: 1335-1342.
- Amaral, J. D. (1994) – *Os citrinos*. Clássica Editora. Lisboa.
- Amoozegar-Fard, A.A.; Nielsen, D.R.; Warrick, A.W. (1982) – Soil solute concentration distributions for spatially varying pore water velocities and apparent diffusion coefficients. *Soil Science Society America Journal* **46**: 3-8.
- Ângelo, E. G. (1979) - Salinização de Solos. Caso de solos em horticultura protegida na Campina de Faro. Relatório final do Curso de Eng. Agrónomo. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
- Ayers, R.S. ; Westcot, D.W. (1985) - Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage* **29**, Ver. 1 FAO. Rome
- Antonopoulos, V.Z.; Wysem, G.C.L. (1998) – Modeling of water and nitrogen dynamics on an undisturbed soil and a restored soil after open cast mining. *Agricultural Water Management* **37**: 21-40.

- Bacon, P. E. ; Davey, B.G. (1982) – Nutrient availability under trickle irrigation: II. Mineral nitrogen. *Soil Science Society America Journal* **46**: 987-993.
- Bañuls, J.; Serna, M.D.; Quiñones, A.; Martin, B.; Primo-Millo, E.; Legaz, F. (2000) – Optimización de la fertilización nitrogenada com el inhibidor de la nitrificación (DMPP) com riego por goteo en cítricos. *Levante Agrícola*. 2º Trimestre 2000.
- Bar-Yosef, B (1999) – Advances in fertigation. In *Advances in Agronomy*. Sparks, D.L (ed). nº 65. Academic Press.
- Bar-Yosef, B. ; Sheikholeslami, M.R. (1976) – Distribution of water and ions soils irrigated from a trickle source. *Soil Science Society America Journal* **40**: 575-581.
- Bielorai, H. (1982) – The effect of partial wetting of the root zone on yield and water use efficiency in a drip and sprinkler and sprinkler irrigated mature grapefruit grove. *Irrigation Science* **3**: 89-100.
- Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., Goldberg, D.(1971) – Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. *Soil Science Society America Process* **35**: 675-689.
- Bresler, E. (1975) – Two- dimensional transport of solutes during nonsteady infiltration from a trickle source. *Soil Science Society America Process* **39**: 604-613.
- Brooks, R. H. ; Corey, A.T.(1964) – Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper* nº3, *Civil Engineering*. Dep., Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
- Bruckler, L.; Cockborne, A.M.; Renault, P.; Claudot, B. (1997) – Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. *Irrigation Science* **17**: 53-61.
- Burdine, N. T. (1953) - Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng.* **198**: 71-77.
- Cardoso, J.C. (1965) - *Os solos de Portugal, sua classificação, caracterização e gênese, a sul do Rio Tejo*. Direcção Geral dos Serviços Agrícolas. Lisboa.

- Carranca, C.L.V.A.F. (1996) – *Avaliação de alguns processos do ciclo do azoto em solos portugueses, designadamente através do marcador ¹⁵N*. Tese de doutoramento. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.
- Cassman, K.G. Munns, D.N. (1980) – Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth. *Soil Science Society America Journal* **44**: 1233-1237.
- Castel J.R. ; Buj, A. (1990) – Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science* **11**: 121-127.
- Clothier, B.E.; Scotter, D.; Harper, E. (1985) – Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. *Transactions of the ASAE* **28 (2)**: 497-501.
- Clothier, B.E.; Sauer, T.J. (1988) – Nitrogen transport during drip fertigation with urea. *Soil Science Society of America Journal* **52**: 345-349.
- Clothier, B.E. ; Green, S. (1994) – Rootzone processes and the efficient use of irrigation use of irrigation water. *Agricultural Water Management* **25**: 1-12.
- Costa, J.B. (1973) – *Caracterização e Constituição do Solo* – Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.
- Dasberg, S. (1987) – Nitrogen fertilization in citrus orchards. *Plant and soil* **100**: 1-9.
- De Smedt, F.; Wierenga, P.J. (1978) – Solute transport through soil with nonuniform water content. *Soil Science Society America Journal* **42**: 7-10.
- Dou, H; Alva, A.K.; Khaskural B.R. (1997) – Nitrogen mineralization from citrus tree residues under different production conditions. *Soil Science Society America Journal* **61**: 1226-1232.
- Du Plessis, S. F. (1996) – Factores que afectam a recomendação de adubação de citros na África do Sul. In *IV Seminário Internacional de Citros – Nutrição e Adubação*. Donadio, L.C. e Baumgartner, J. G. (eds). Fundação Cargil. Campinas, Brasil, pg. 51-59.
- Earl, K.D. ; Jury, W. A. (1977) – Water movement in bare and cropped soil under isolated

- trickle emitters: II. Analysis of cropped soil experiments. *Soil Science Society America Journal* **41**: 856-861.
- Edwards, J.H.; Bruce, R.R.; Horton, B.D.; Chesness, J.L.; Wehunt, E.J. (1982) – Soil cation and water distribution affected by NH_4NO_3 applied through a drip irrigation system. *Journal of the American Society for Horticulturae Science* **107** (6): 1142-1148.
- Elrik, D.E.; Clothier, B.E. (1990) – Solute transport and leaching. In *Irrigation of agricultural crops*. B.A Stewart e D.R Nielsen (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº30. Madison, Wisconsin, USA, pg. 94-126.
- Fares, A ; Alva, A K. (2000) – Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science* **19**: 57-64.
- Fernández-Boy, E.; Aparicio, M.G. ; Cabrera, F. ; Murillo, J. M. ; Moreno, F. (1994) – Lixiviado de nitrato en un suelo franco arenoso cultivado de maiz bajo riego y dos fertilizaciones. *Riegos y drenajes XXI* **74**: 8-13.
- Gardner, W.R.(1991) – Modeling water uptake by roots. *Irrigation Science* **12**: 109-114
- Gimenéz-Montesinos, M.; Oltra-Cámara, M. (1998) – Curso de fertirrigación por goteo de los cítricos (Cálculo informatizado). Escuela Superior de Orihuela. Universidade Miguel Hérnandez.
- Gish, T.J .; Jury, W.A. (1983) – Effect of plant roots and roots channels on solute transport. *Transactions of the ASAE* **26** (2): 440-444.
- Guillard, K; Grifflin, G.F.; Allinson, D.W.; Yamartino, W.R.; Rafey, M.M. ; Pietrzyk, S.W. (1995) - Nitrogen utilization of selected cropping systems in the U.S.Northeast: II. soil profile nitrate distribution and accumulation. *Agronomy Journal* **87**: 199-207.
- Gomes, T.M; Saad, J.C.C.; Cruz, R.L.; Dias, C.T.S. (1998) – Avaliação da concentração e distribuição de nitrato, amónio e nitrato provenientes de ureia aplicada via sistema de irrigação por gotejamento. *Irriga-Botucatu* **3** (2): 64-75.
- Havelka, U.D.; Boyle, M.G.; Hardy, R.W.F. (1982)- Biological nitrogen fixation. In *Nitro-*

gen in agricultural soils. F.J. Stevenson, J.M. Bremner, R.G. Hauck e D.R. Keeney, (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº22. Madison, Wisconsin, USA, pg. 365-422.

Hillel, D. (1990) – Role of irrigation in agricultural systems. In *Irrigation of agricultural crops.* B.A Stewart e D.R Nielsen (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº30. Madison, Wisconsin, USA, pg. 5-30.

Jansson, S.L.; Persson, J. (1982) – Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In *Nitrogen in agricultural soils.* F.J. Stevenson, J.M. Bremner, R.G. Hauck e D.R. Keeney, (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº22. Madison, Wisconsin, USA, pg. 229-252.

Jaynes, D.B. ; Rice, R.C. (1993) – Transport of solutes as affected by irrigation method. *Soil Science Society America Journal* **57**: 1348-1353.

Jury, W. A ; Earl, K.D. (1977) – Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: I. Analysis of bare soil Experiments. *Soil Science Society America Journal* **41**: 852-856.

Jury, W. A ; Earl, K.D. (1977) – Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: II. Analysis of cropped soil experiments. *Soil Science Society America Journal* **41**: 856-861.

Kanwar, R.S.; Baker, J.L.; Johnson, H.P. (1984) – Simulated effects of fertilizer management on nitrate loss with tile drainage water for continuous corn. *Transactions of the ASAE* **27 (5)**: 1396-1399;1404.

Kanwar, R.S.; Baker, J.L. ; Laflen, J.M. (1985) – Nitrate movement through the soil profile in relation to tillage system and fertilizer application method. *Transactions of the ASAE* **28 (6)**: 1802-1807.

Kengni, L.; Vachaud, G.; Thony, J.L.; Laty, R. ; Garino, B.; Casabianca, H.; Jame, P.; Viscogliosi, R. (1994) – Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. *Journal of Hydrology* **162**: 23-46.

Khan, A. A.; Yitayew, M.; Warrick, A.W. (1996) – Field evaluation of water and solute dis-

tribution from a point source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **122**: 221-227.

Klepper, B. (1991) – Crop root system response to irrigation. *Irrigation Science* **12**:105-108

Knox, E.; Moody, D.W. (1991) – Influence of hydrology, soil properties, and agricultural land use on nitrogen in groundwater. In *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. R.F. Follett, D.R. Keeney e R.M. Cruse (eds.). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pg. 19-57.

Lafolie, F. ; Guennelon, R.; Van Genuchten (1989a) – Analysis of water flow under trickle Irrigation I: Theory and numerical solution. *Soil Science Society America Journal* **53**: 1310-1318.

Lafolie, F. ; Guennelon, R.; Van Genuchten (1989b) – Analysis of water flow under trickle irrigation II: Experimental evaluation. *Soil Science Society America Journal* **53**: 1318-1323.

Leah, E.W. ; Frederick, S.D. (1991) – Fertigation and growth of young “Hamlin” orange trees in Florida. *HortScience* **26 (2)**: 106-109.

Legg, J.O.; Meisinger, J.J. (1982) – Soil nitrogen budgets. In *Nitrogen in agricultural soils*. F.J. Stevenson, J.M. Bremner, R.G. Hauck e D.R. Keeney, (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph n°22. Madison, Wisconsin, USA, pg. 503-566.

Levin, I.; Rooyen, P. C.; Rooyen, F.C. (1979) – The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Science Society America Journal* **43**: 8-16.

Li, Y.; Ghodrati, M. (1994) – Preferential transport of nitrate through soil columns containing root- channels. *Soil Science Society America Journal* **58**: 653-659.

Lockington, D.; Parlange, J.T.; Surin, A. (1984) – Optimal prediction of saturation and wetting fronts during trickle irrigation. *Soil Science Society America Journal* **48**: 488-494.

Martin, D.L.; Gilley, J.R.; Skaggs, R.W. (1991) – *Soil Water Balance and Management*. In

Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. R.F. Follett, D.R. Keeney e R.M. Cruse, (eds.). Soil Science of America, Madison, Wisconsin, USA, pg 200-236.

Meisinger, J.J.; Randall, G.W. (1991) – *Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems.*

In *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability.* R.F. Follett, D.R. Keeney e R.M. Cruse, (eds.). Soil Science of America, Madison, Wisconsin, USA, pg 85-124.

M..A.D.R.P. (1997) – *Código das Boas Práticas Agrícolas.* Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas . Lisboa.

Miyazaki, T. (1993) – *Water flow in soils.* Marcel Dekker Inc. New York.

Moreno, F.; Cayuela, J.A.; Fernández, E; Fernández-Boy, E.; Murillo, J.M.; Cabrera, F. (1996) – Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural Water Management* **32**: 71-83.

Moresher, S.; Cohen, Y.; Fuchs, M. (1983) – Response of mature “Shamouti” orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. *Irrigation Science* **3**: 223-236.

Moutonnet, P.; Pagenel, J. F.; Fardeau, J. C. (1993) – Simultaneous field measurement of nitrate – nitrogen and matric pressure head. *Soil Science Society America Journal* **57**: 1458-1462.

Mualem, Y. (1976) – A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* **12**: 513-522.

Murali, V. ; Aylmore, L.A.G.A. (1981) – A convective-dispersive-adsortive flow model for solute transport in soils. I Model description and some simulations. *Australian Journal Soil Resources* **19**: 23-39.

Obreza, T. A. (1996) – Adubação de plantas cítricas na Florida, EUA – Uma visão geral. **In** *IV Seminário Internacional de Citros – Nutrição e Adubação.* Donadio, L.C. e Baumgartner, J. G. (eds). Fundação Cargil. Campinas, Brasil, pg. 27-39.

Oliveira, I. (1993) – *Técnicas de Regadio (Tomo II)* . Instituto de Estruturas Agrárias e Desenvolvimento Rural. Lisboa.

Orphanos, P.I.; Eliades, G. (1994) – Nitrogen fertigation of Valencia orange irrigated by drip or minisprinkler. *Acta Horticulturae* **365**: 105-119.

Paltineanu, I.C. ; Starr, J.L. (1997) – Real time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society America Journal* **61**: 1576-1585.

Persson, M.; Berndtsson, R. (1998) – Texture and electrical conductivity on temperature-dependency in Time Domain Reflectometry. *Soil Science Society America Journal*. **62**: 887-893.

Peterson, G.A.; Power, J.F. (1991) – Soil, crop, and water management. In *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. R.F. Follett, D.R. Keeney e R.M. Cruse, (eds.). Soil Science of America, Madison, Wisconsin, USA, pg 189-198.

Reddy, K.R. ; Patrick, W. H. ; Phillips, R.E. (1980) – Evaluation of selected processes controlling nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Science Society America Journal* **44**: 1241-1246.

Revol, P.; Clothier, B.E.; Kosuth, P.; Vachaud, G. (1996) – The free-water pond under a trickle source field test of existing theories. *Irrigation Science* **16**: 169-173.

Richards, L.A.; Weaver, L.R. (1944) – Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. *Jour. Agr. Res.*, **69**: 215-235.

Rolston, D.E.; Rauschkolb, R.S.; Phene, C.J. ; Miller, R.J.; Urin, K.; Carlson, R.M.; Henderson, D.W. (1979) – Applying nutrients and other chemicals to trickle-irrigated crops. University of California. Division of Agricultural Sciences. Bulletin 1893.

Russel, M.B. (1939) – Soil moisture sorption curves for four Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **4**: 51-54.

Santos, D.V.S. (1994) – Fertirregação – Evolução da concentração de nitratos em canteiros

de nível (simulação com o modelo Opus). Dissertação de Mestrado, ISA-UTL, Lisboa

Santos, F.L.L. (1997) – *Transferência de água e solutos no solo.* Publicações Universidade de Évora”. Departamento de Engenharia Rural, Évora

Santos, J.Q. (1991) – *Fertilização. Fundamentos da utilização dos adubos e correctivos.* Colecção Euroagro. Publicações Europa América.

Shani, U.; Hanks, R.J.; Bresler, E.; Oliveira, C.A.S.(1987) – Field method for estimating tting hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. *Soil Science Society America Journal* 51: 298-302.

Schepers, J.S.; Mosier, A.R. (1991) – Accounting for nitrogen in nonequilibrium soil crop systems. In *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability.* R.F. Follett, D.R. Keeney e R.M. Cruse, (eds.). Soil Science of America, Madison, Wisconsin, USA, pg 125-138.

Schmidt, E.L. (1982) – Nitrification in soil. In *Nitrogen in agricultural soils.* F.J. Stevenson, J.M. Bremner, R.G. Hauck e D.R. Keeney, (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº22. Madison, Wisconsin, USA, pg. 253-288.

Schofield, R.K. ; Costa, J.B. (1935) – The determination of the pF at permanent wilting and the moisture equivalent by the freezing point method. *Trans 3rd Int. Congr. Soil Science*, 1: 6-10.

Serna, M.D.; Borrás, R.; Legaz, F; Primo-Millo, E. (1992) – The influence of nitrogen concentration and ammonium/nitrate ratio on N-uptake, mineral composition and yield of Citrus. *Plant and Soil* 147: 13-23.

Singh, P.; Kanwar, R.S.;Thompson, M.L. (1991) – Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. *Soil Science Society America Journal* 55: 1674-1679.

Smedt, F.D.;Wierenga, P.J. (1978) – Solute transport through soil with nonuniform water content. *Soil Science Society America Journal* 42: 7-10.

Smith, R. E. (1983) – Approximate soil water movement by kinematic characteristics. *Soil Science Society America Journal* **47**: 3-8.

Smith, S.J.; Cassel, D.K. (1991) – Estimating nitrate leaching in soil materials. In *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. R.F. Follett, D.R. Keeney e R.M. Cruse, (eds.). Soil Science of America, Madison, Wisconsin, USA, pg 165-188.

Syvertsen, J.P. (1996) – Nutrição e stresse hídrico. In *IV Seminário Internacional de Citros – Nutrição e Adubação*. Donadio, L.C. e Baumgartner, J. G. (eds). Fundação Cargil. Campinas, Brasil, pg. 189-199.

Syvertsen, J.P. ; Smith, M.L. (1996) – Nitrogen uptake efficiency and leaching losses from lysimeter-grow citrus trees fertilized at three nitrogen rates. *Journal of the American Society for Horticulturae Science* **121 (1)** : 57-62.

Swietlik, D. (1992) – Yield, growth, and mineral nutrition of young *Ray Ruby* grapefruits trees under trickle or flood irrigation and various nitrogen rates. *Journal of the American Society for Horticulturae Science* **117 (1)**: 22-27.

Terry, R. E. (1980) – Nitrogen mineralization in Florida histsols. *Soil Science Society America Journal* **44**: 747-750.

Trindade, H. (1997) – Fluxos e perdas de azoto em explorações forrageiras intensivas de bovinicultura leiteira no noroeste de Portugal. Tese de doutoramento. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real.

Topp, G.C.; Davis, , J.L.; Annan, A.P. (1980) – Electromagnetic determinations of soil water content: Mesasurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* **16**: 574-582.

Van Genuchten, M. T. (1980) - A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal* **44**: 892-898.

Vogeler, I.; Clothier, B.E.; Green, S.R.; Scotter, D.R.; Tillman, R.W. (1996) – Characterizing water and solute movement by Time Domain Reflectometry and Disk Permeametry. *Soil Science Society America Journal* **60**: 5-12.

Wallach, R. ; Steenhuis, T.S. (1998) – Model for nonreactive solute transport in structured soils with continuous preferential flow paths. *Soil Science Society America Journal* **62**: 881-886.

Wang, F.L; Alva, A.K. (1996) – Leaching of nitrogen from slow release urea sources in sandy soils. *Soil Science Society America Journal* **60**: 1454-1458.

Watts, D.G., Martin, D.L. (1981) - Effects of water and nitrogen management on nitrate leaching loss from sands. *Transactions of the ASAE* **24** (4): 911-916.

Warrick, A.W. (1974) – Time dependent linearized infiltration. I. Point sources. *Soil Science Society America Process* **38**: 383-386.

Warrick, A. W. (1990) – Nature and dynamics of soil water. In *Irrigation of agricultural crops*. B.A Stewart e D.R Nielsen (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº30. Madison, Wisconsin, USA, pg. 69-92.

Willis, L.E. ; Davies, F.S. ; Graetz, D.A. (1991) – Fertigation and growth of young 'Hamlin' orange trees in Florida. *Hortscience* **26**(2): 106-109.

Wooding, R.A. (1968) – Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research* **4**: 1259-1273.

Young, J.L.; Aldag, R.W. (1982) – Inorganic forms of nitrogen in soil. In *Nitrogen in agricultural soils*. F.J. Stevenson, J.M. Bremner, R.G. Hauck e D.R. Keeney, (eds). ASA, CSSA, SSSA, Agronomy Monograph nº22. Madison, Wisconsin, USA, pg. 43-66.

Zur, B. (1996) – Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science* **16**: 101-105.



