

AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DE NITRATOS NA ZONA VULNERÁVEL DE AVEIRO

Daniela V. dos SANTOS; M^a Filomena P. MIGUENS; José Manuel M. GONÇALVES

Eq. Professor Adjunto, dsantos@esac.pt; Eq. Assistente, filomenam@esac.pt; Professor Adjunto, jmmg@esac.pt na Escola Superior Agrária do Instituto Superior Politécnico de Coimbra, Bencanta 3040-316 Coimbra.

RESUMO

A zona agrícola vulnerável estudada abrange seis freguesias no concelho de Aveiro, apresentando características particulares que potencializaram o rápido transporte de nitratos em profundidade no solo e consequente contaminação das águas subterrâneas: a) a tradição centenária na aplicação de grandes quantidades de matéria orgânica para melhoria da estrutura e fertilidade de solos originalmente arenosos, o que lhes confere actualmente características de solos férteis, bem arejados e boa capacidade para o armazenamento da água; b) lençóis freáticos pouco profundos; c) solos de reduzida CTC e elevada drenagem; d) óptimas temperaturas para a rápida mineralização da matéria orgânica durante a Primavera/Verão, seguidas de elevada pluviosidade no Outono/Inverno.

O presente trabalho insere-se no âmbito do projecto Agro 10 tendo sido caracterizados os dois sistemas de produção representativos localmente quanto a: práticas agrícolas, composição química e textura dos solos, comportamento hidrodinâmico pela determinação da porosidade até aos 30 cm e das curvas de condutividade hidráulica através de registos *in situ* com infiltrómetro de tensão e curvas características determinadas em laboratório.

Na avaliação do potencial de lixiviação foi utilizado o modelo RZWQM98 (Ahuja *et al.*, 1999) depois de calibrado e validado para os dois sistemas de produção. Foram explorados diferentes cenários com vários níveis de azoto mineral, considerando-se nas simulações dos escoamentos a *aproximação a dois domínios*.

Foi quantificada a importância dos macroporos nos fluxos hídricos e de solutos nos solos estudados e após validação do modelo estimaram-se lixiviações de 7% e 17% do total de azoto aplicado respectivamente nas culturas forrageiras e nas rotações com hortícolas; ficando definidas algumas boas práticas de gestão dos factores água e fertilizantes azotados para a região.

Palavras-chave: macroporosidade, infiltrómetro de tensão, lixiviação de nitratos, zonas vulneráveis



1- INTRODUÇÃO

O projecto Agro 10 decorreu entre 2002 e 2005 nos ecossistemas agrícolas da Zona Vulnerável de Aveiro, correspondendo à área de protecção do aquífero quaternário de Aveiro, que abrange as freguesias de São Bernardo, Oliveirinha, Eixo, Santa Joana, N. Sr^a de Fátima e Glória. A agricultura praticada caracteriza-se por ser de minifúndio, predominantemente do tipo familiar a tempo completo ou parcial. O índice de vulnerabilidade desta zona foi definido como médio a elevado.

Os resultados das campanhas realizadas a Fevereiro e Outubro de 2000 e Fevereiro de 2001, no âmbito do Programa de Acção aprovado para a zona, evidenciaram os elevados teores em nitratos nos poços, fontes e cursos de água. Em 154 amostras analisadas, apenas 16% continham concentrações em nitratos inferiores a 50 ppm, em 42% os teores estavam entre os 50 e 100 ppm e em 42% os teores eram superiores a 100 ppm (Martins e Santos, 2002).

A região localiza-se numa **mancha de solos** litólicos não-húmicos normais (Cambissols), de materiais arenáceos de textura mediana a ligeira e de relevo plano, com declives inferiores a 1%. Predominam as **actividades** de pecuária bovina leiteira e a horticultura intensiva de ar livre, tratando-se de uma zona muito produtiva com todos os problemas decorrentes de tal intensidade de produção, tornando-a mais vulnerável à contaminação do solo e aquíferos.

A **fertilização azotada** é tradicionalmente de origem orgânica, embora também seja usada a fertilização mineral em menor percentagem. A fertilização orgânica é reservada principalmente às forrageiras e milho-grão, consistindo na aplicação de estrume, chorume e adubos orgânicos tratados de origem animal (bovina, suína ou avícola) antes da sementeira. Em adubação de fundo são comuns os adubos ternários e em cobertura, adubos nítricos com cerca de 25% N ou soluções azotadas em culturas regadas.

Por ser uma região de **pluviosidade** média confortável o número de regas anual é reduzido, assim como as dotações de rega. A **rega** não é prática tradicional e os sistemas de rega presentes são maioritariamente de aspersão, com uma gestão incipiente, dotações não controladas e reduzidas eficiências de rega.

Os campos de ensaios experimentais e de demonstração foram instalados nas freguesias de Oliveirinha, com culturas hortícolas ao ar livre, e N.^a Sr^a de Fátima, com culturas forrageiras. Foram abertos perfis do solo para a caracterização hidrodinâmica e química. *In situ* foram realizadas determinações das taxas de infiltração com infiltrómetro de tensão para posterior caracterização da macroporosidade e obtenção das curvas de condutividade hidráulica, $K(h)$. Nos tratamentos em culturas hortícolas foram instalados lisímetros para a colheita de lixiviados. Em ambas as parcelas foram instalados tubos de acesso à sonda TDR para a monitorização do teor de humidade do solo e piezómetros para a colheita de amostras da toalha freática. O monitorio das concentrações de nitratos no solo foi realizado pela simples colheita de amostras de solo com sonda de meia-cana até à profundidade dos 30 cm.

Concluída a caracterização hidrodinâmica do solo e reunido um vasto conjunto de informação sobre as práticas de fertilização representativas na região, procedeu-se à validação do modelo de simulação RZWQM (Root Zone Water Quality Model).

É um modelo determinístico, com uma forte componente física, que incorpora os processos físicos, químicos, biológicos e de gestão mais significativos num sistema agrícola. Integra os principais processos que ocorrem na região não-saturada do solo e o desenvolvimento da cultura (Ahuja *et al.*, 1999). Como simula os processos que ocorrem no perfil do solo na zona de exploração das raízes, permite avaliar o impacto ambiental sub-superficial de diferentes práticas de gestão em agricultura, nomeadamente: os diferentes níveis de mobilização do solo, as práticas de gestão da rega e drenagem, os métodos de aplicação de fertilizantes e pesticidas.



2- MATERIAL E MÉTODOS

São descritas as metodologias seguidas para a caracterização hidrodinâmica, quantificação da macroporosidade e validação do modelo RZWQM.

2.1 Caracterização hidrodinâmica

Abriam-se perfis de solo para a classificação textural e retiraram-se amostras não-perturbadas para a determinação das curvas características, $\theta(h)$, ou curvas pF, aos 0-20 cm, 20-40 e 40-60 cm de profundidade com determinação de 7 pontos (pF 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 e 4.2). Nas mesmas amostras foi também determinada a densidade aparente no perfil de solo.

Foi quantificada a macroporosidade e determinadas as curvas de condutividade hidráulica a partir dos registos do infiltrómetro de tensão *in situ*.

O volume de água drenada a uma determinada pressão pode ser relacionado com o volume de poros de diâmetro superior a um diâmetro equivalente dado pela equação clássica da capilaridade:

$$y = \frac{2\sigma \cos \beta}{\pi r} \quad (1)$$

Em que y representa a coluna de líquido deslocada devido ao efeito de capilaridade, r é o raio máximo dos poros verticais em contacto com a superfície do solo, por onde a água pode entrar, σ é a tensão superficial da água e β o ângulo de contacto água/sólido.

De acordo com Watson e Luxmoore (1986) a Equação de Poiseuille pode ser re-escrita em termos do número de macroporos por m^2 (N):

$$N = (8\mu K_d) / (\rho_w g \pi r^4) \quad (2)$$

Sendo μ a viscosidade dinâmica da água, ρ_w a densidade da água e K_d a diferença entre as condutividades para duas tensões consecutivas.

Os mesmos autores calcularam a porosidade efectiva para cada gama de tensões através da seguinte equação:

$$\theta_e = N \pi r^2 \quad (3)$$

Assim a porosidade efectiva, θ_e , corresponde ao volume total da quantidade de poros determinada por unidade de volume de solo.

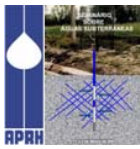
O infiltrómetro de tensão permite medir o fluxo de água que se infiltra no solo sob diferentes tensões de água. A imposição de tensões sequencialmente maiores ou menores, por exemplo de 0 a 15 cm ou de 15 a 0 cm, origina a drenagem ou o preenchimento incremental de poros cada vez menores ou maiores e os fluxos de infiltração decrescem ou crescem à medida que um maior número de poros se esvazia ou se enche. Fluxos de escoamento relativos elevados, indicam grande quantidade de poros contínuos dentro de uma determinada classe de diâmetros (Cameira, 1999).

Nos registos realizados foram utilizadas quatro tensões: 0 cm, 3 cm, 6 cm e 15 cm numa sequência descendente, determinando-se assim quatro classes de poros (Tabela 1).

É utilizada a aproximação de Wooding (1968) para a determinação da condutividade hidráulica em função da pressão efectiva – $K(h)$:

$$Q = \pi r^2 K \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (4)$$

onde Q é o volume de água que entra no solo por unidade de tempo, K é a condutividade hidráulica, r é o raio da área circular de infiltração. A condutividade hidráulica corresponde, na aproximação de Wooding, à função $K(h)$ determinada por Gardner (1958) e α é um parâmetro dessa mesma função:



$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad (5)$$

em que K_s é a condutividade hidráulica saturada e h é a pressão efectiva.

Tabela 1 – Classes de poros consideradas na separação da matriz do solo em dois domínios.

tensão de água (cm)	raio médio dos poros	designação dos poros	domínios da matriz do solo
0	$r > 0,5$ mm	macroporos	<i>matriz diferenciada</i> onde ocorrem fluxos preferenciais (macroporosidade)
3	$0,25 < r < 0,5$ mm	mesoporos-1	
6	$0,10 < r < 0,25$ mm	mesoporos-2	
15	$r < 0,10$ mm	microporos	<i>matriz homogénea</i> (fluxos estimados pela eq. Darcy)

Com o infiltrómetro de tensão registam-se *in situ* os volumes de água que entram no solo por unidade de tempo, Q , para duas tensões; por exemplo, à tensão h_1 e h_2 . Substituindo-se a condutividade K , dada pela expressão de Gardner, na equação de Wooding, fica-se com:

$$Q(h_1) = \pi r^2 K_{\text{sat}} \exp(\alpha h_1) \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (6)$$

e

$$Q(h_2) = \pi r^2 K_{\text{sat}} \exp(\alpha h_2) \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (7)$$

Dividindo-se uma equação pela outra obtém-se o parâmetro da equação de Gardner, α :

$$\alpha = \frac{\ln[Q(h_2)/Q(h_1)]}{h_2 - h_1} \quad (8)$$

Conhecido o valor α pode-se então calcular a K_s a partir de qualquer uma das duas equações anteriores. Com os valores da K_s e α determinados, obtém-se finalmente a equação de Gardner para a condutividade hidráulica, substituindo-se os respectivos parâmetros na referida equação. Com a relação da condutividade hidráulica em função da pressão efectiva, $K(h)$, pode-se determinar os valores da condutividade hidráulica para qualquer h .

2.2 Validação do modelo RZWQM

A aplicação do modelo com alguma fiabilidade na predição dos lixiviados e perfis residuais de nitratos, obriga pelo menos à calibração das componentes hidrodinâmicas e à introdução do máximo de informação reunida sobre as práticas de aplicação do azoto. Neste sentido, foram ajustadas as curvas de pF e de condutividade hidráulica, obtendo-se os parâmetros da equação de Brooks-Corey modificada que descreve as mesmas no modelo; introduziu-se toda a informação climática registada no local, uma completa caracterização química do solo, dos estrumes, chorumes e correctivos orgânicos aplicados, conseguida através das análises de amostras colhidas.

As curvas características e de condutividade hidráulica que foram ajustadas aos valores observados para serem introduzidas no modelo RZWQM são curvas do tipo Brooks-Corey (1964) (eq. 9 a 12) modificadas e o ajustamento dos parâmetros que as constituem correspondeu ao trabalho de calibração do modelo na componente hidrodinâmica (Figuras 1 e 2).

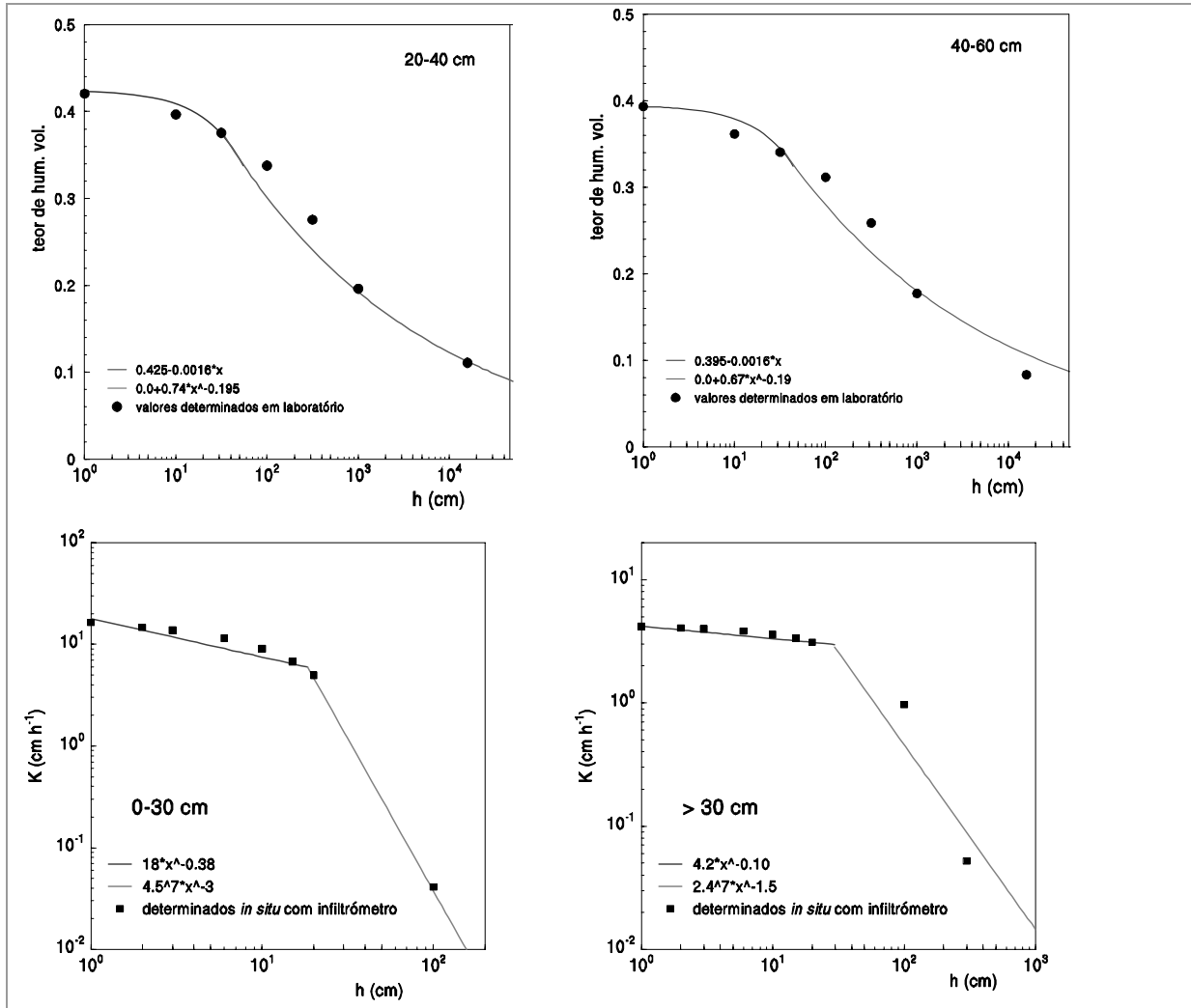
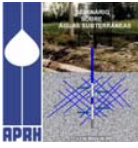


Figura 1 – Curvas características e de condutividade hidráulica ajustadas para a calibração do modelo RZWQM no solo com rotação de hortícolas.

$$\theta(h) = \theta_s - A_1 h; \quad h \leq h_b \quad (9)$$

$$\theta(h) = \theta_r - B h^{-\lambda}; \quad h > h_b \quad (10)$$

em que:

θ – teor de humidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

h – pressão efectiva da água no solo (cm),

θ_s – teor de humidade à saturação no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

θ_r – teor de humidade residual no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

h_b – pressão de entrada de ar no solo (cm).

A_1 , B e λ são as constantes ou parâmetros calibrados quando se ajusta a curva aos valores observados.

$$K(h) = K_s h^{-N_1}; \quad h \leq h_{bK} \quad (11)$$

$$K(h) = K_2 h^{-N_2}; \quad h > h_{bK} \quad (12)$$

em que:

K – condutividade hidráulica (cm h^{-1}),

K_s – condutividade hidráulica à saturação do solo em água (cm h^{-1}),



h_{BK} – pressão de entrada de ar para estas equações e que poderá ser igual à pressão de entrada de ar das equações 9 e 10.
 N_1 , N_2 e K_2 são as constantes calibradas.

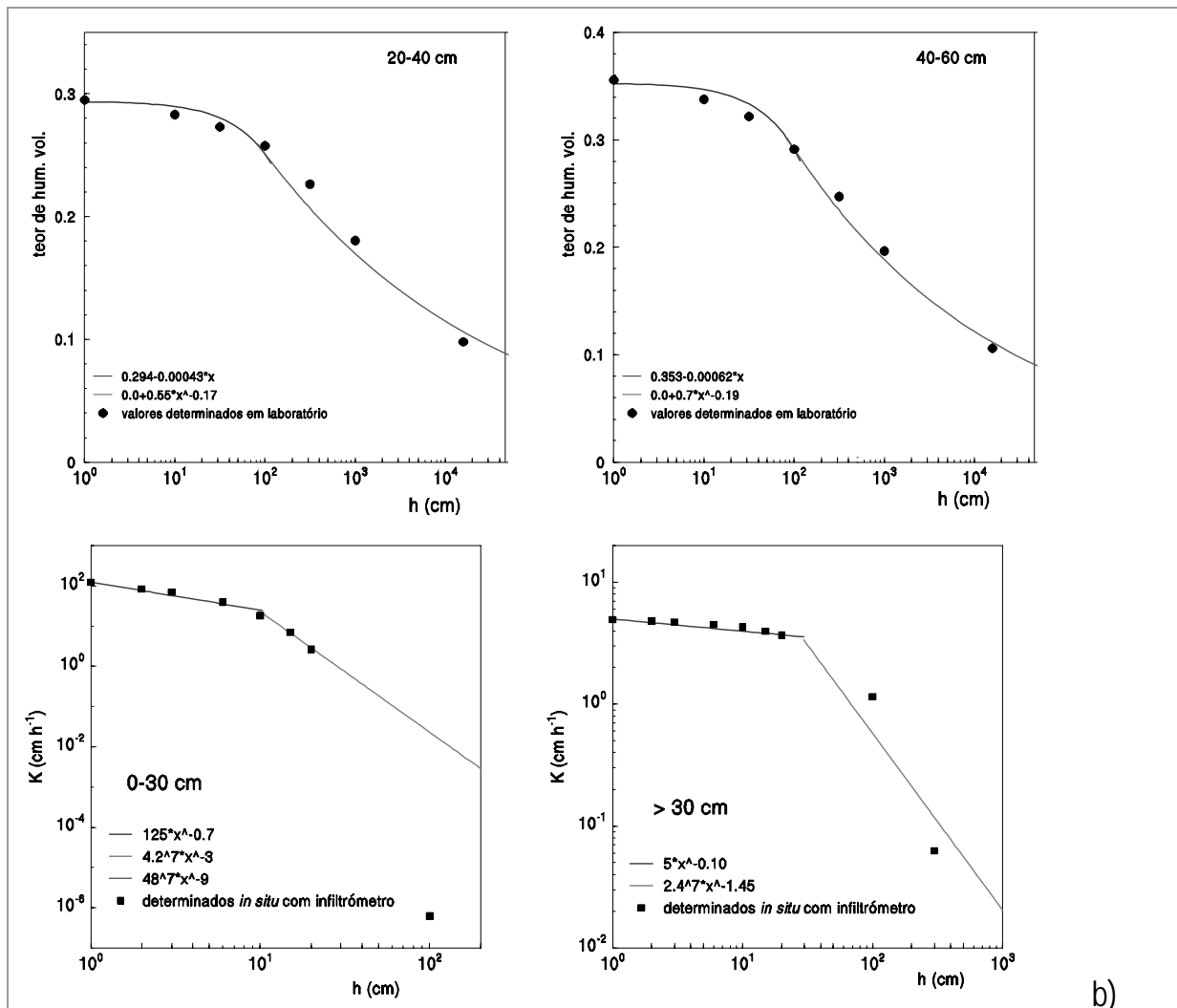


Figura 2 – Curvas características e de condutividade hidráulica ajustadas para a calibração do modelo RZWQM no solo com forrageiras.

3- RESULTADOS

Para a calibração e validação do modelo foram considerados os tratamentos experimentais que mais se aproximam das práticas agrícolas da região e os tratamentos com baixos níveis de azoto mineral. Tradicionalmente nas culturas hortícolas são utilizados correctivos orgânicos, nomeadamente o de origem ovina com designação comercial de "Fraysinnet" (1,8% N) e fertilização azotada mineral, realizada à instalação de cada cultura na rotação. Nas forrageiras é tradicional a aplicação anual de 20 a 25 ton/ha de estrume bovino proveniente das vacarias e de 10 a 20 mil litros/ha de chorume resultante da lavagem das mesmas, distribuídos por duas vezes ao ano, no Outono/Inverno (de Outubro a Janeiro) e na Primavera/Verão (de Março a Maio). Os estrumes têm em média de 0,60 a 0,65% de N e os chorumes de 0,05 a 0,1 % de N. A fertilização azotada mineral situa-se entre os 300 e 400 kg N/ha, para o milho. No Outono/Inverno, sempre que as condições de humidade do solo o permitam, é realizada a sementeira dos ferrejos que desempenham o papel de uma *catch-crop*.



Considerando as avaliações realizadas aos sistemas de rega, a determinação das taxas de infiltração e importância da macroporosidade nos solos, bem como a capacidade de armazenamento para a água; foi possível fornecer alguns indicadores e parâmetros úteis para o dimensionamento dos sistemas de rega por aspersão (Tabela 2). Os cenários simulados tiveram como referência tais indicadores para as dotações de rega consideradas.

Tabela 2 – Indicadores para o dimensionamento e gestão dos sistemas de rega na região

Indicadores	Hortícolas	Forrageiras
tipo de sistemas de rega	por aspersão (média ou baixa pressão), gota-a-gota	por aspersão (média ou alta pressão)
dotação máxima de modo a prevenir lixiviações	70 mm/regagem	130 mm/regagem
frequência (intervalo entre regas)	3 dias (alface x couve) 5 dias (batata x couve)	3 a 5 regas entre as 12 folhas e o enchimento do grão
dotação total por rega para satisfazer as necessidades hídricas (ER ^a 60-65%)	14-16 mm (alface x couve) 25-30 mm (batata x couve)	30-50 mm (5 regas) 50-80 mm (3 regas)
pluviosidade máxima dos aspersores	33 mm/h ^b	39 mm/h ^b

^a eficiência de rega considerada para estimar as dotações

^b qualquer sistema de rega por aspersão disponível no mercado tem pluviosidade inferior a estes valores

3.1 Lixiviação de nitratos

As amostras da água da toalha freática foram recolhidas em dois piezômetros nas parcelas ocupadas com culturas forrageiras. A Figura 3 apresenta os valores máximos e mínimos de concentração de NO₃ observados em cada data. Constata-se que em média as concentrações são iguais ou maiores do que as 50 ppm e que é nos meses de menor precipitação que são superiores, isto porque a quantidade de solutos (NO₃) é a mesma para um menor volume de solvente durante a época seca. Se a contribuição da toalha freática for cerca de 30% da evapotranspiração real do milho, valor normal em situações de toalha freática superficial e solos de boa drenagem, a cultura poderá ganhar de 13 a 17 kg/ha de N-NO₃.

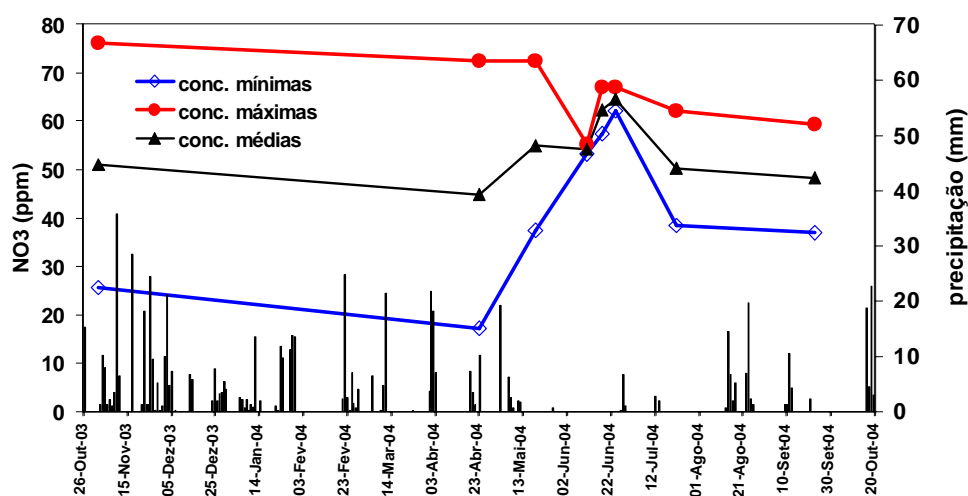
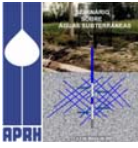


Figura 3 – Evolução das concentrações de nitratos na toalha freática dos solos ocupados por forrageiras.



Os lisímetros foram instalados em tratamentos com e sem correctivo orgânico, com e sem fertilizantes nitroamoniacais convencionais e com um fertilizante de libertação controlada. Deste modo, as legendas para alguns dos diferentes tratamentos considerados são as seguintes:

N0 – sem aplicação de fertilizantes minerais,

E1 – aplicação de 2000 kg/ha de correctivo orgânico “Fraysinnet” (estrume de ovinos com 1,8% N, 63% de M.O. e C/N de 15),

Nitra 4 – 220 kg N/ha de fertilizante nitroamoniacal a 26% de N,

N2 – 110 kg N/ha de fertilizante nitroamoniacal a 26% de N (½ em adubação de fundo e ½ em adubação de cobertura),

3.2 Quantificação da macroporosidade

Com a informação dos registos realizados foi quantificada e caracterizada a macroporosidade, dividida em macro e duas classes de mesoporos (meso-1 e meso-2). A porosidade efectiva (Figura 4) corresponde apenas ao volume ocupado por poros hidrológicamente activos, ou seja, através dos quais a água se movimenta no solo, ficando assim excluídos quaisquer poros obstruídos ou isolados.

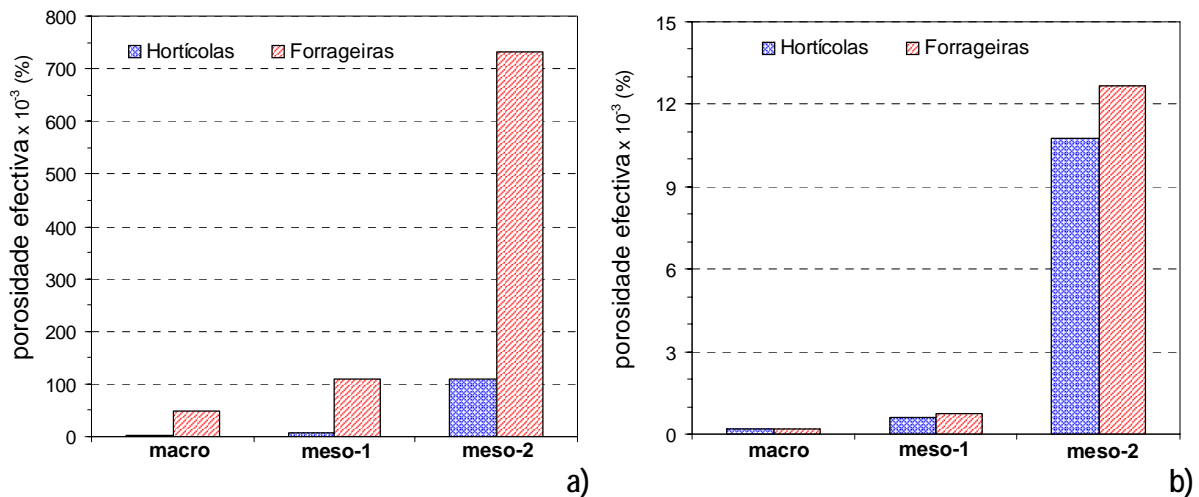


Figura 4 – Distribuição da macroporosidade por classes nos solos ocupados por hortícolas e nos solos ocupados por forrageiras. a) à superfície do solo, b) aos 30-40 cm de profundidade.

Observa-se na Figura 4 que à superfície há uma nítida distinção quanto à macroporosidade dos dois solos. Nas parcelas com forrageiras a macroporosidade é bem mais representativa, sendo esta constituída maioritariamente pelos mesoporos-2, ou seja, pela classe de poros mais pequena dentro da macroporosidade. Do mesmo modo, nos solos ocupados pelas hortícolas a macroporosidade é também constituída essencialmente pelos mesoporos-2.

Em ambos os solos observa-se uma descontinuidade da macroporosidade na camada dos 30-40 cm de profundidade, onde ela é bem menos representativa do que à superfície, prevalecendo igualmente os mesoporos-2. A maior expressão da macroporosidade à superfície nos solos ocupados por forrageiras, traduz-se numa condutividade hidráulica à saturação 6x superior à dos solos com hortícolas.

3.3 Aplicação do modelo RZWQM

A qualidade da calibração foi verificada pela comparação dos teores de humidade do solo simulados com os obtidos nas parcelas através da sonda TDR nos anos de 2003 e 2004 (Figura 5). Os valores simulados aproximam-se de forma bastante satisfatória à média dos teores de humidade registados nas parcelas (Figura 5).



Assegurados os resultados satisfatórios relativos à predição do comportamento hidrodinâmico do solo e introduzida a máxima informação relativa ao azoto, tal como os teores de M.O. do solo, natureza dos fertilizantes, estrumes e correctivos orgânicos aplicados, percentagem e formas de azoto contidas nos mesmos e relações C/N; há confiança na predição realizada pelo modelo para a evolução das concentrações de nitratos no solo e para a quantidade de nitratos lixiviados. De facto, na componente relativa ao azoto não há muitos valores que possam ser confrontados com os simulados, apesar do volume de amostras e análises ter sido vasto num projecto que pretendeu uma elevada abrangência nas questões relativas ao comportamento do azoto nesta zona vulnerável.

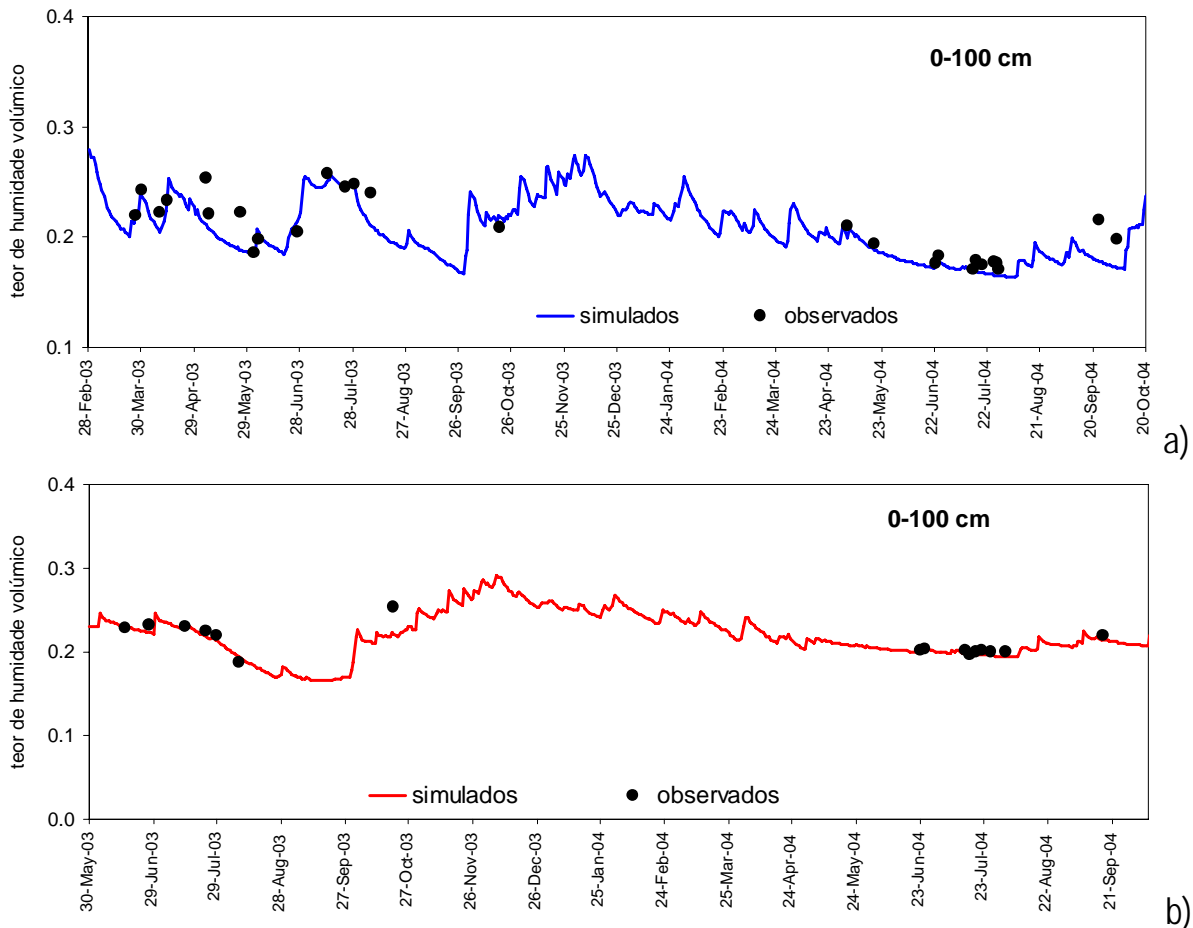


Figura 5 – Evolução dos teores de humidade nas parcelas ocupadas com hortícolas (a) e nas parcelas com culturas forrageiras (b).

O modelo não prevê a utilização de fertilizantes de libertação controlada, pelo que para testá-lo foram realizadas apenas simulações relativas a alguns tratamentos com fertilizantes convencionais nitro-amoniacais e à *posteriori* simulações de alguns cenários para verificação de dotações e frequências de rega que possam reduzir os lixiviados, bem como propostas de diferentes fraccionamentos do adubo aplicado em cobertura.

Na Figura 6 podem-se comparar as predições do modelo para a lixiviação ocorrida num dos tratamentos em que foram instalados lisímetros.

Os valores observados correspondem a um volume de solução do solo colhidos que resultam da lixiviação ocorrida durante o intervalo de tempo entre amostras. Para compará-los com os simulados, que correspondem a lixiviação contínua diária, distribuíram-se as concentrações colhidas de acordo com as alturas de precipitação diária, multiplicando-as por um factor de ponderação que é a razão da precipitação diária e da precipitação total no intervalo.

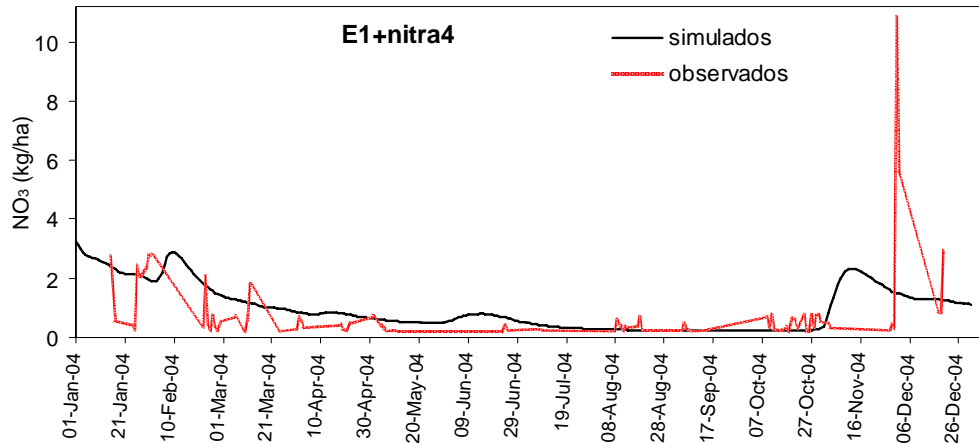
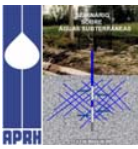


Figura 6 – Comparação entre as concentrações de nitratos lixiviados em lisímetros e os simulados.

Verifica-se que a lixiviação diária observada não segue exactamente o mesmo modelo da simulada, o que era esperado visto não se dispor de registos contínuos da lixiviação nos lisímetros e daí as diferenças entre as médias diárias e respectivos desvios-padrão entre os valores simulados e observados (Tabela 3), mas constata-se que o total dos valores simulados é semelhante aos observados (Tabela 3), havendo uma boa sobreposição dos picos registados (Figura 6), excepto para o penúltimo registo que aparece concentrado num pico de lixiviação elevado e o modelo prevê uma distribuição bem mais gradual dos lixiviados naquele intervalo (Figura 6). No entanto, o ajustamento é satisfatório proporcionando confiança na predição dos lixiviados para os diferentes tratamentos que serão discutidos mais adiante.

Tabela 3 – Lixiviação simulada e observada nos tratamentos realizados em lisímetros instalados nas parcelas com rotação alface x couve.

Tratamento	Total N-NO ₃ (kg/ha)		média	
	observados	simulados	observados	simulados
E1+N0	8.94	6.75	0.10 (±0.22)	0.02 (±0.02)
E1+N2	29.84	24.83	0.36 (±0.71)	0.29 (±0.33)
E1+nitra4	52.60	49.50	0.58 (±1.37)	0.15 (±0.14)

3.3.1 Culturas hortícolas

O modelo prevê concentrações de nitratos elevadas durante a maior parte do ano para a rotação alface x couve (Figura 7), caindo bruscamente para níveis quase nulos após a época chuvosa, ainda durante a permanência da couve e quando se observa simultaneamente as maiores concentrações de lixiviados. Os perfis residuais após 3 anos de rotação são apenas ligeiramente superiores aos perfis iniciais (Figura 7).

As reduzidas concentrações de nitratos durante a época chuvosa, a meio do estágio da cultura couve, contrastando com as elevadas concentrações logo após a aplicação dos fertilizantes azotados, permitem sugerir que um maior fraccionamento do adubo de cobertura, com uma ou outra aplicação mais tardia, seria benéfico para a cultura e reduziria a lixiviação de nitratos.

A lixiviação total estimada pelo modelo para todo o período de observações (33 meses) correspondeu a cerca de 145 kg N/ha e 265 kg N/ha nos tratamentos com 110 kg N/ha e 220 kg N/ha em cobertura, respectivamente (Figura 7). Tal corresponde a uma percentagem de 17% do N total



aplicado nos respectivos tratamentos, sendo que tal ocorre especialmente durante os períodos de maior precipitação no Outono-Inverno.

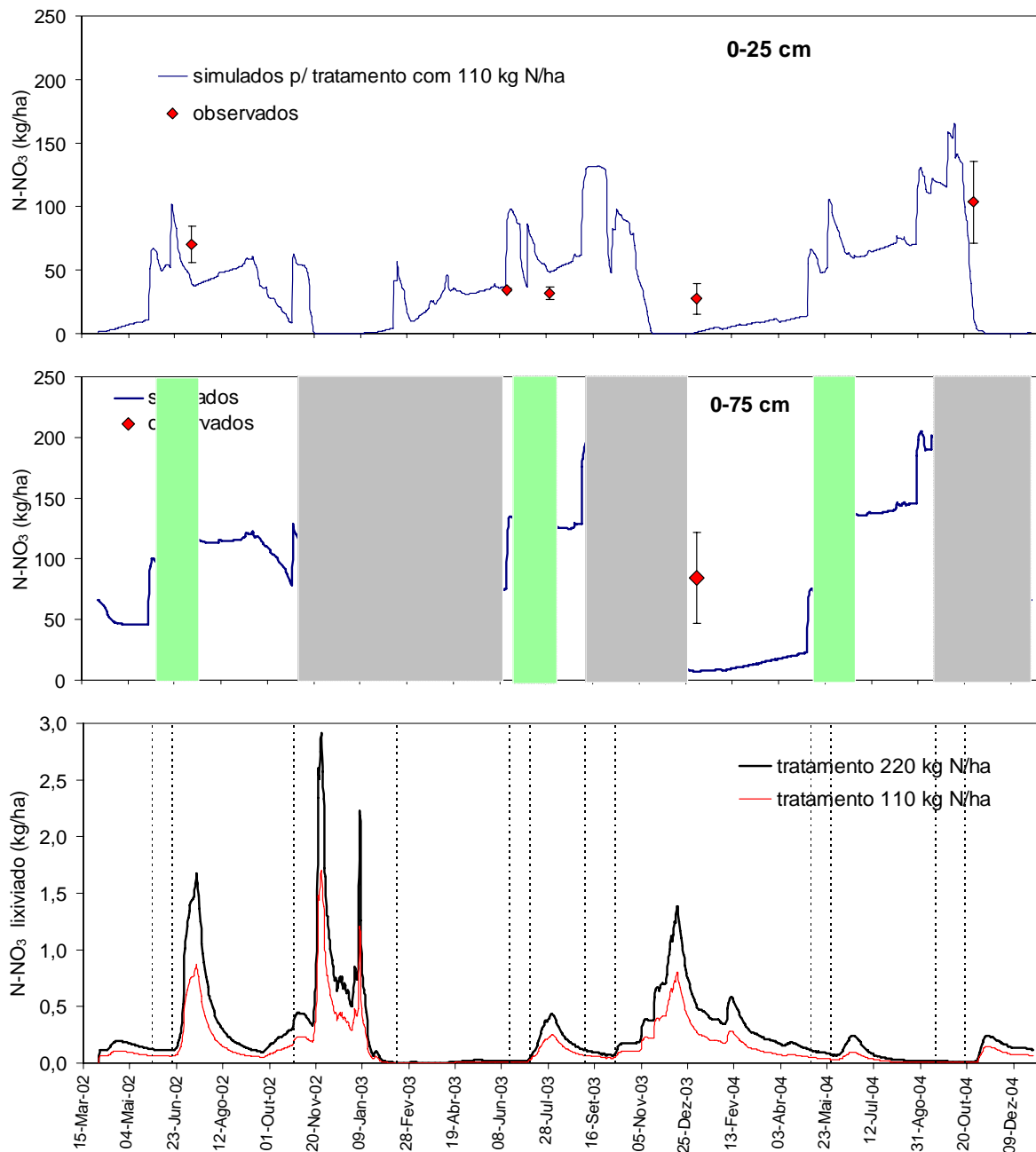


Figura 7 – Evolução da concentração de nitratos no solo (tratamento com 2000 kg/ha de correctivo orgânico + 110 kg N/ha de fertilizante nitroamoniaco) e lixiviação de nitratos em culturas hortícolas. Rotação alface (verde) x couve (cinzento). O tracejado indica as datas de fertilização azotada.

3.3.2 Culturas forrageiras

A Figura 8 apresenta a evolução esperada para os nitratos no solo ocupado por culturas forrageiras. Observa-se uma resposta imediata à aplicação de N através dos fertilizantes nitroamoniacois, pelas elevadas concentrações de nitratos no solo durante o período Primavera-Verão. Após a colheita do milho essas concentrações são reduzidas. A importância dos lixiviados é diminuta



(Figura 8), pelo que se conclui que houve uma absorção eficiente do azoto por parte do milho. De qualquer modo, é notório que a lixiviação é significativamente superior durante a época de chuvas, especialmente quando o solo não está ocupado, o que se observa no Outono-Inverno de 2002/03.

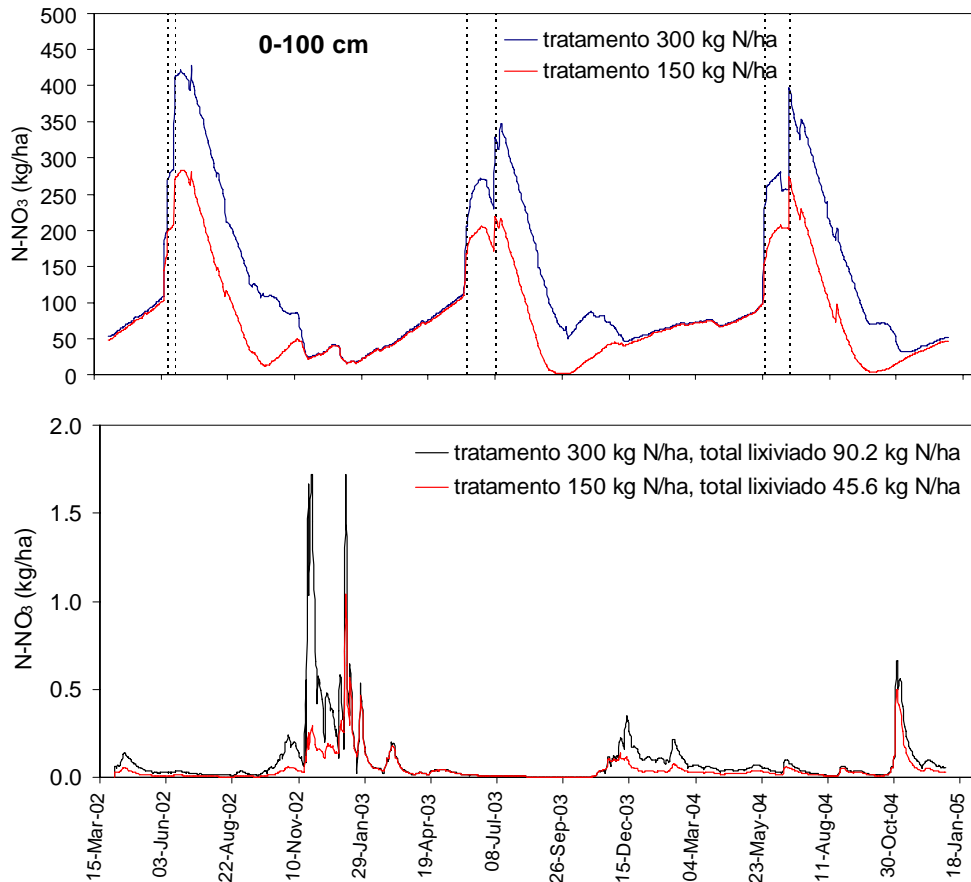
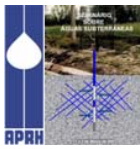


Figura 8 – Evolução da concentração de nitratos no solo e lixiviação de nitratos em culturas forrageiras. Tratamento anual de 10000 kg/ha de estrume bovino + fertilizante nitroamoniacal (150 e 300 kg N/ha). O tracejado indica as datas de adubações azotadas.

A reduzida lixiviação produzida durante a época de regas, quando comparada com a das culturas hortícolas, dever-se-á principalmente ao tipo de raizame, que no caso do milho ocupa um volume de solo consideravelmente superior ao ocupado pelo raizame de hortícolas como alface ou couve. Tal proporciona uma maior oportunidade de absorção dos nitratos, reduzindo-se a sua mobilidade para além da zona radicular. Mesmo entre as rotações alface x couve e batata x couve, para os mesmos níveis de azoto, registaram-se maiores lixiviações na rotação com alface do que na rotação com batata. Para além das necessidades em azoto serem diferentes entre as culturas, o volume de solo explorado pelas raízes também influenciará a quantidade de nitratos lixiviados. Neste sentido, culturas diferentes exigirão um fraccionamento diferente dos fertilizantes azotados aplicados em cobertura.

3.3.3 Cenários avaliados para a gestão da água e fertilizantes azotados

Confirmada a validade do modelo para realizar predições nas condições estudadas, pode-se desenhar alguns cenários diferentes das práticas de gestão adoptadas nas parcelas experimentais. Deste modo, considerando-se uma gestão da água de rega de acordo com as necessidades da cultura, deve-se distribuir a dotação total de rega ao longo dos diferentes estágios da cultura no sentido de não ser aplicada água em excesso, prevenindo-se tanto quanto possível a lixiviação de nitratos.



Para as forrageiras na região, estimou-se que as necessidades hídricas do milho estariam entre 275 a 330 mm. Se 30% desta evapotranspiração for satisfeita pela toalha freática, a dotação efectiva de rega necessária seria de 190 a 230 mm. Considerando que ao longo dos 3 anos a precipitação no período de permanência do milho, foi de 60 a 80 mm por ano, bastava que a dotação de rega efectiva fosse de 110/130 a 150/170 mm. Esta deveria ser distribuída entre 3 a 5 regas dentro do período de maiores necessidades hídricas (entre as 12 folhas e o enchimento do grão). Tendo estes valores como referência, a situação experimental será comparada com outros 3 cenários, nos quais para o mesmo nível de azoto será alterada a gestão da rega. As dotações efectivas serão fraccionadas em 4 regas realizadas entre o estágio de 12 folhas e enchimento do grão.

Tabela 4 – Resultados dos cenários avaliados para diferentes dotações de rega anual, fraccionadas em 4 regas. A dotação anual de 100 mm aplicados numa rega corresponde às condições experimentais (situação de referência).

Cenários	Tratamento 150 kg N/ha		Tratamento 300 kg N/ha	
	Δ produção	Δ lixiviação	Δ produção	Δ lixiviação
100 mm/ 1 rega ^{a)}	-----	-----	-----	-----
100 mm/ 4 regas	+ 11,2 %	+ 24 %	+ 11,6 %	+ 13,9 %
170 mm/ 4 regas ^{b)}	+ 10,7 %	+ 35 %	+ 10,9 %	+ 29,1 %
240 mm/ 4 regas ^{c)}	+ 11,4 %	+ 58%	+ 11,1 %	+ 49,7 %

a) dotação de rega praticada na parcela experimental

b) dotação que satisfaz as necessidades hídricas máximas para as condições estudadas

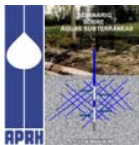
c) dotação excessiva para as condições estudadas

Aparentemente o fraccionamento das dotações de rega não contribuem para uma redução da lixiviação total (Tabela 4). De facto, é reduzida a lixiviação na época de regas, que se estende de meados de Julho ao fim de Agosto nos anos de 2002 e 2003 e de meados de Junho ao fim de Julho em 2004 (Figura 9), mas é aumentada a lixiviação na época de chuvas (Figura 9) porque o fraccionamento das dotações de rega estimula a nitrificação devido aos processos alternados de humedecimento-dessecação.

São no entanto consistentes os aumentos de produção logo que se proporcione um maior conforto hídrico à cultura durante os estágios de maiores necessidades. Verifica-se, no entanto, que para valores acima dos 170 mm, como exemplo considerou-se uma dotação excessiva de 240 mm, os ganhos de produção são praticamente os mesmos mas a lixiviação aumenta muito significativamente. Observa-se que apenas para valores desta ordem ou para dotações elevadas por rega, como os 100 mm/1 rega, ocorrem lixiviações durante a estação de regas (Figura 9). Na verdade o maior potencial de lixiviação ocorre na época chuvosa e tanto mais quanto melhores forem as condições para a nitrificação durante a Primavera-Verão. Sem qualquer rega a lixiviação seria apenas 3,2% menor do que a ocorrida nas condições experimentais (100 mm/ano aplicados apenas numa rega) porque a lixiviação ocorre essencialmente no período Outono/Inverno (Figura 9).

Além do referido é notório que no Outono/Inverno 2002/03 a lixiviação foi bem mais importante (Figura 9) por não ter sido instalada uma cultura de inverno que funcionasse como *catch crop*. Em 2003/04 e 2004/05 a lixiviação já é bem menos importante por ter sido instalada a cultura de Outono/Inverno e, particularmente em 2004/05 por ter sido a precipitação total bem mais reduzida.

Comparando-se os dois tratamentos para os mesmos cenários de gestão da rega (Tabela 5), verifica-se facilmente que os aumentos de produção são insignificantes para o tratamento 300 kg N/ha, mas a lixiviação quase que duplica, o que torna desaconselhável estes níveis de fertilização azotada.



As dotações de rega praticadas nas parcelas experimentais ocupadas com hortícolas corresponderam a praticamente o dobro das necessidades reais. Estima-se que para as condições das parcelas experimentais as necessidades hídricas anuais da alface sejam cerca de 165 mm e da batata cerca de 240 mm. Neste sentido considera-se um cenário com estas dotações e intervalos de rega de 3 e 5 dias, respectivamente para a alface e para a batata.

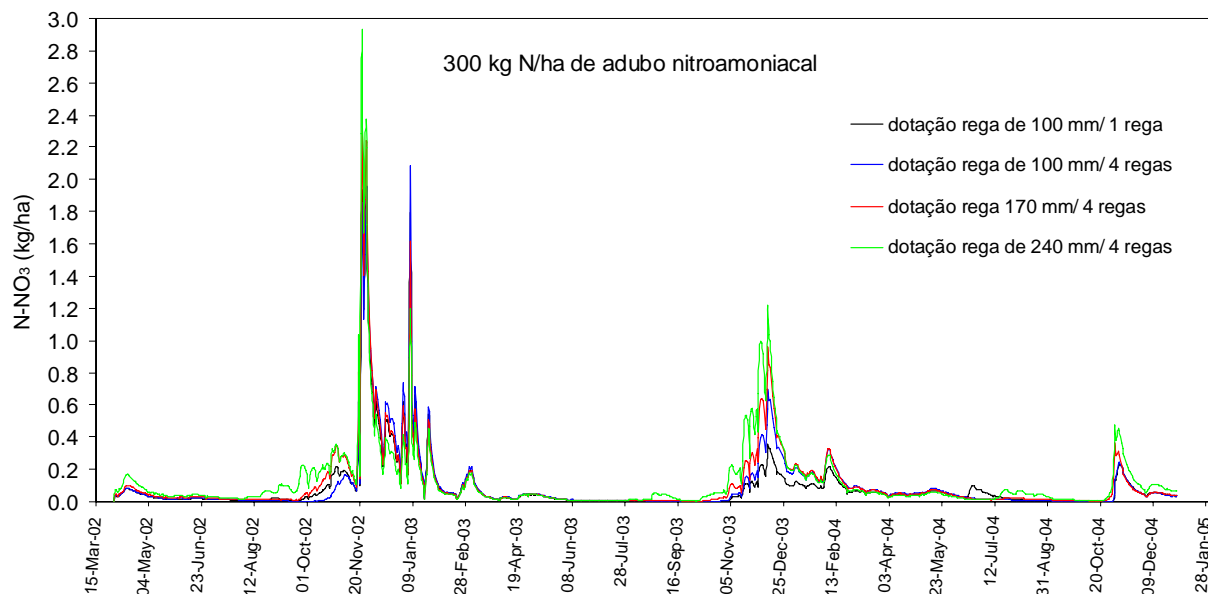


Figura 9 – Evolução da lixiviação em diferentes cenários de gestão da rega para os tratamentos com 150 e 300 kg N/ha nas forrageiras. Tratamento anual de 20000 kg/ha de estrume bovino + 10000 kg/ha de chorume + fertilizante nitroamoniacoal.

Constatando-se que grande parte da lixiviação ocorre durante a época chuvosa (Figura 10) e os perfis residuais de nitratos após a alface são elevados, propõe-se um cenário sem qualquer fertilização mineral quando da instalação da couve e, por fim, um maior fraccionamento da adubação de cobertura (1/3 de fundo e 2/3 em 2 coberturas).

Tabela 5 – Comparação entre tratamentos (150 e 300 kg N/ha) para os cenários considerados. O tratamento de referência é o de 150 kg N/ha.

Cenários	Δ produção	Δ lixiviação
100 mm/ 1 rega	+ 1,5 %	+ 98,3 %
100 mm/ 4 regas	+ 1,2 %	+ 82,1 %
170 mm/ 4 regas	+ 1,2 %	+ 89,2 %
240 mm/ 4 regas	+ 0,57 %	+ 88,0 %

Na Tabela 6 estão quantificadas, em relação à situação experimental, as reduções na lixiviação para os diferentes cenários de gestão da fertilização mineral e considerando a rega apropriada às culturas.

Observa-se que uma rega mais adequada e um maior fraccionamento das adubações de cobertura reduzem mais significativamente a lixiviação nos tratamentos com menores quantidades de azoto mineral (Tabela 6). Isto porque tais práticas tornam a absorção do azoto mais eficiente e assim a quantidade de nitratos disponíveis para a lixiviação será mais significativamente reduzida nos tratamentos que levam logo à partida menor quantidade de azoto. Por sua vez, a supressão da



fertilização mineral da cultura de Outono/Inverno, independentemente dos tratamentos, reduz a lixiviação para metade (Tabela 6).

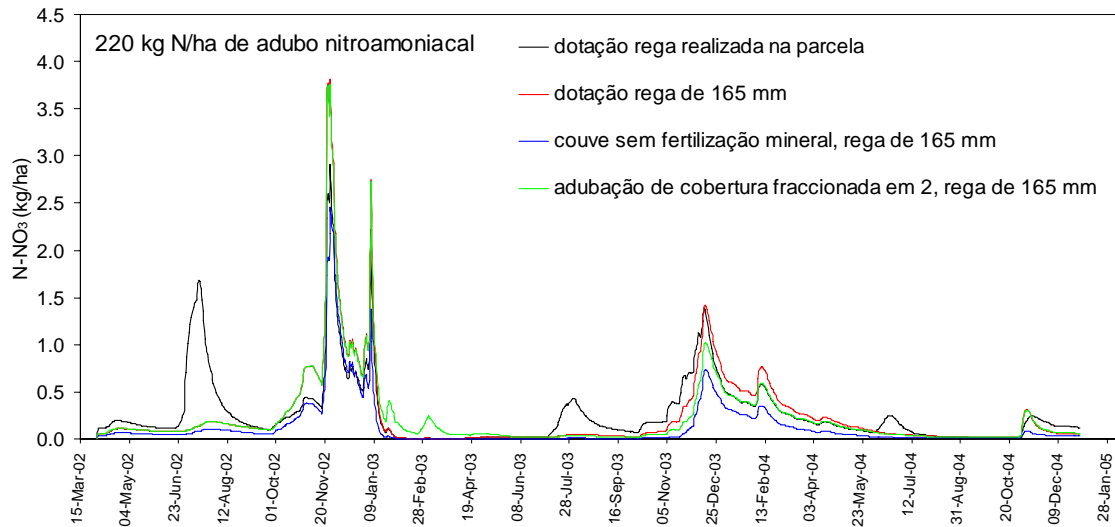


Figura 10 – Evolução da lixiviação em diferentes cenários de gestão da rega para os tratamentos com 110 e 220 kg N/ha. Tratamento anual de 2000 kg/ha de correctivo orgânico Fraysinnet + fertilizante nitroamoniacal. Rotação alface x couve.

Tabela 6 – Alteração na lixiviação de nitratos para os diferentes cenários face à situação experimental.

Cenários	alface x couve	
	110 kg N/ha	220 kg N/ha
165 mm/240 mm	-16,1 %	-9,9 %
sem fertilização mineral da couve	-55,4 %	-53,6 %
2 adubações de cobertura	-23,0 %	-15,0 %

4- CONCLUSÕES

O trabalho realizado para a caracterização física e hidrodinâmica do solo permitiu concluir que tratando-se de solos originalmente arenosos sujeitos à intervenção humana que consistiu durante séculos na deposição de grandes quantidades de matéria orgânica, hoje são solos de excelente potencial produtivo, não só pelo elevado teor de matéria orgânica que constitui a grande fonte de azoto, mas essencialmente pelas características físicas que esta lhe conferiu, tornando-o arejado, com agregados estáveis e uma elevada capacidade de armazenamento para a água.

Foi possível quantificar a importância dos macroporos nos fluxos hídricos e de solutos nos solos estudados, concluindo-se que deverão ser levados em conta quando da predição do movimento de tais solutos com modelos.

Da aplicação do modelo RZWQM quantificou-se a lixiviação produzida pelas práticas e alguns tratamentos nas parcelas experimentais, os quais tentaram retractor a média das práticas agrícolas na região. Verificou-se que nas forrageiras a lixiviação corresponde em média a 7% do total de azoto aplicado e nas rotações com hortícolas a 17% do total de azoto aplicado.

Os níveis de precipitação e as contribuições da toalha freática tornam as necessidades de rega reduzidas nas **forrageiras** e como tal também a lixiviação é particularmente reduzida na cultura de Primavera/Verão, o milho. Mesmo assim, os cenários explorados para diferentes práticas de gestão da água de rega permitiram concluir que nas culturas forrageiras um fraccionamento da rega favorece de



tal modo a nitrificação que no período Outono/Inverno a lixiviação é superior, tendo-se no entanto, como contrapartida um aumento de produção. Observou-se que a instalação de uma cultura Outono/Inverno funcionando como *catch crop* reduz significativamente os níveis de nitratos lixiviados.

Nas culturas **hortícolas** as dotações de rega tradicionalmente praticadas, acabam por ser na totalidade da estação, elevadas. A prática de regas que garantam apenas o conforto hídrico da cultura, com intervalos que podem ir dos 3 aos 5 dias ou um maior fraccionamento do adubo aplicado em cobertura, conduzem a reduções importantes da lixiviação. É primordial a realização de uma cultura Outono/Inverno que exporte uma grande quantidade de azoto, como a generalidade das couves, podendo-se colocar a hipótese de suprimir a fertilização mineral para esta cultura, visto que os perfis residuais da cultura antecedente são bastante elevados.

BIBLIOGRAFIA

AHUJA, L.; K. ROJAS, J. HANSON, M. SHAFFER E L. MA – “RZWQM, Modeling management effects on water quality and crop production”, *Water Resources Publications*, LLC, 1999, Colorado USA.

BROOKS, R.H.; A.T. COREY – Hydraulic properties of porous media. *Colorado State Univer. Hydrology Paper* nº 3, 1964, CO-EUA.

CAMEIRA, M. R. C. – “Balanço de água e azoto em milho regado no vale do Sorraia: discussão dos processos de transferência e aplicação do modelo RZWQM98”. *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Agrónómica*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, 1999.

GARDNER, W.R. – “Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table”. *Soil Sci.* 85(4), 1958, pp. 228-232.

MARTINS, M.I.M; D.V.S DOS SANTOS – “Gestão do Azoto em Ecossistemas Agrícolas da Zona Vulnerável de Aveiro com vista à redução da poluição das águas com nitratos” – Projecto Agro 10. in *Atas do I Seminário em Agricultura Sustentável e Ambiente*, Universidade Independente, 2002, Moita.

WATSON, K.W. E R.J. LUXMOORE – “Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer”. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1986, pp. 578-582.

WOODING, R. A. – “Steady infiltration from a shallow circular pond”. *Water Resour. Res.*, 4, 1968, pp. 1259-1273.