Universidade de Évora

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

ESTUDO DA EROSIVIDADE DA REGA EM SULCOS DECLIVOSOS

Maria Filomena Parreira Miguens

ÉVORA

1997

Universidade de Évora

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

ESTUDO DA EROSIVIDADE DA REGA EM SULCOS DECLIVOSOS

Maria Filomena Parreira Miguens

Dissertação apresentada na Universidade de Évora para satisfação parcial dos requesitos para a obtenção do grau de Mestre.

87579

ÉVORA

1997

Agradecimentos

A colaboração e o apoio de várias pessoas foi indispensável para a concretização deste trabalho. Assim é com grande prazer e como prova do meu reconhecimento que aqui menciono os que mais directamente para isso contribuiram.

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Ricardo Serralheiro, orientador deste estudo, o apoio, as sugestões, a revisão do texto e a disponibilidade que sempre demonstrou no esclarecimento das dúvidas que surgiram ao longo do trabalho.

Aos colegas Shakib Shahidiam e Pedro Quartim que comigo colaboraram na preparação do material e na execução dos ensaios de campo, o meu reconhecimento. Esta cooperação foi essencial para a realização do ensaio.

Às colegas Isabel Larangeira e Luisa Guterres o meu especial agradecimento pelo seu empenho no duro trabalho de campo desenvolvido.

Ao Engenheiro Baieta agradeço a ajuda prestada no tratamento estatístico dos resultados.

Aos colegas Luis Leopoldo Silva e Rafael Marques da Silva agradeço a disponibilidade sempre demonstrada.

Ao Sr Freixa, responsável pela Herdade do Cabido, agradeço a disponibilização do campo de ensaios e toda a colaboração prestada.

Gostaria também de agradecer à técnica de laboratório Beatriz Castor toda a ajuda dedicada.

E finalmente agradeço a todos que de alguma forma contribuiram para a realização deste trabalho.

Resumo

O estudo realizado pretendeu avaliar a perda de sedimentos provocada pela rega em sulcos com declives diferentes e supostamente demasiado acentuados num solo Argiluviado do Alentejo. O estudo baseou-se em ensaios realizados num campo organizado pelo agricultor, utilizando para cada declive um módulo parcelar específico, à partida considerado "não erosivo".

Foi feito o levantamento topográfico dos sulcos determinando os declives longitudinais, definindo os troços de sulcos com declives distintos, para fins de modelação e controle do processo de rega. Foi também acompanhada a evolução dos perfis transversais dos sulcos para determinação das equações da área e do perimetro molhado e da largura superficial, em função da altura de água sobre o talvegue.

As equações de infiltração do tipo de Kostiakov foram obtidas pelo programa ANREGA que utiliza o método do balanço volumétrico proposto por Elliot e Walker (1982) e adaptado por Serralheiro (1988) a este tipo de equações.

As equações obtidas e os valores observados de caudais, tempos de rega, declive e geometria dos sulcos foram introduzidos no programa SIRMOD e comparados os resultados da simulação com os resultados reais, realizando assim a validação do modelo SIRMOD para a situação em estudo.

Verificou-se que a perda de sedimentos no fim do sulco não é afectada pelo declive nos limites ensaiados. No entanto, os resultados mostraram que a perda de sedimentos no fim do sulco sofre alterações com o número de regas realizadas. A variação da erosão ao longo da época de rega mostra que o valor total final não é suficiente para traduzir a perda de sedimentos, é também importante conhecer a sua evolução ao longo da época de rega.

O modelo de simulação utilizado não reproduz correctamente o avanço, calculando normalmente tempos de avanço mais elevados que os verificados durante a rega.

Palavras chave: *sulcos, erosão, declive, solos argiluviados.*

Índice

pág.

1. INTRODUÇÃO **3**

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 3

1.2 OBJECTIVOS GENÉRICOS 4

1.3 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS DO ESTUDO 4

2. EROSÃO NA REGA POR SULCOS **7**

2.1 FACTORES QUE CONDICIONAM A EROSÃO 8

2.1.1 Erodibilidade *8*

2.1.2 Erosividade *10*

2.2 EROSÃO, TRANSPORTE E SEDIMENTAÇÃO NA REGA POR SULCOS 11

2.3 FACTORES QUE INFLUENCIAM O DESTACAMENTO, O TRANSPORTE E A SEDIMENTAÇÃO. 16

2.3.1 Declive *16*

2.3.2 Caudal *18*

2.3.3 Comprimento do sulco *19*

2.3.4 Rugosidade *20*

2.3.4.1 Presença de resíduos ou plantas 21

2.3.5 Mobilização *21*

2.3.6 Número de regas *22*

2.4 EFEITO DA EROSÃO NA PRODUTIVIDADE DO SOLO 22

3. MODELAÇÃO DA REGA DE SUPERFÍCIE E CARACTERIZAÇÃO DA INFILTRAÇÃO EM SULCOS **25**

3.1 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO 25

3.1.1 Modelo hidrodinâmico completo *27*

3.1.2 Modelo de inércia nula *28*

3.1.3 Modelo da onda cinemática *28*

3.1.4 Modelo do balanço volumétrico *29*

3.2 A INFILTRAÇÃO NA REGA POR SULCOS 30

3.2.1 Factores que afectam a infiltração *30*

3.2.2 Equações de infiltração *32*

3.2.3 Determinação das equações de infiltração *34*

3.2.3.1 Método de Elliot e Walker 36

3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA REGA 39

4. MATERIAL E MÉTODOS **42**

4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE ENSAIOS 42

4.1.1 Localização *42*

4.1.2 Topografia 42
4.1.3 Caracterização hidropedológica 43
4.1.4 Caracterização da infiltração em solos argiluviados 46
4.1.5 Caracterização da fase de avanço nos solos argiluviados 47
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 49
4.2.1 Caudais de alimentação 52
4.2.1.1 Medição do caudal 52
4.2.2 Caracterização da fase de avanço 53
4.2.3 Caracterização da fase de recessão 53
4.2.4 Profundidade de escoamento 54
4.2.5 Geometria da secção transversal 55
4.2.5.1 Perfilómetros 56
4.2.5.2 Determinação da área e do perímetro 59
4.2.6 Caracterização da rugosidade 60
4.2.7 Avaliação do caudal excedente e da perda de sedimentos no fim do sulco 60
4.3 AVALIAÇÃO DAS REGAS REALIZADAS 63
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 66
5.1.1 Evolução dos perfis longitudinais 66
5.2 AVALIAÇÃO DAS REGAS REALIZADAS 72
5.2.1 Caracterização do avanço 72
5.2.2 Caracterização da infiltração 77
5.3 AVALIAÇÃO DA PERDA DE SEDIMENTOS 81
5.3.1 Análise estatística 84
5.4 SIMULAÇÕES DA REGA 89
5.4.1 Apresentação do modelo de simulação de rega "Sirmod" 89
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 94
6.1 CONCLUSÕES 94
6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS 95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
ANEXOS

Anexos

Anexo 1. - Ficheiro de armazenamento das coordenadas dos pontos digitalizados que constitui o ficheiro de entrada do programa DIGITEQ 101

Anexo 2. - Ficheiro de armazenamento do programa DIGITEQ 101

Anexo 3. - Exemplo de cálculo das equações que caracterizam a área e o perímetro molhados apresentados pelo programa DIGITEQ 102

Anexo 4. - Valores dos parâmetros das equações da área e do perímetro molhado, nas formas: $P_m = P_0 \cdot y^{R_0}$ e $A_m = \sigma_1 \cdot y^{\sigma_2}$ 103

Anexo 5. - Cálculo dos parâmetros da equação $A^2 \cdot R^{4/3} = \rho_1 \cdot A^{\rho_2}$, utilizada no programa SIRMOD para relacionar a área da secção transversal com o raio hidráulico. 105

Anexo 6. - Cálculo da largura da secção tranversal para y_{maximo} e para $y_{maximo}/2$ 106

Anexo 7. - Ficheiro de saída do Programa ANREGA (exemplo) 107

Anexo 8. - Avaliação regas utilizando o programa ANREGA 109

Anexo 9. - Concentração de sedimentos nas amostras de água recolhidas no fim do sulco, (mg/l) 110

Anexo 10. - Ficheiro de saída do programa SIRMOD (exemplo) 111

Anexo 11. - Resultados das simulações realizadas com o programa SiRMOD 112

Lista de figuras

Figura 2.1 - Variação do escoamento (Q), da taxa de erosão (E), da capacidade erosiva (E_C), da carga de sedimentos transportada (T), da capacidade de transporte (T_C) e da deposição (D) com a distância ao longo do sulco com declive constante. 17

Figura 4.1 - Carta topográfica da parcela experimental. 43

Figura 4.2 - Esquema da parcela onde foi realizado o ensaio. 48

Figura 4.3 - Aspecto geral da parcela. 49

Figura 4.4 - Torneiras instaladas nas janelas do tubo de alimentação. 51

Figura 4.5 - Aparelho utilizado para registar os tempos de avanço. 54

Figura 4.6 - Definição das secções de referência. 55

Figura 4.7 - Utilização de um perfilómetro de régua moldável. 56

Figura 4.8 - Perfilómetro de barras. 57

Figura 4.9 - Colocação do perfilómetro para efectuar a leitura e pormenor da definição do contorno do sulco pelas varetas. 58

Figura 4.10 - Marcação dos pontos que definem o perfil na folha de papel. 58

Figura 4.11 - Instalação das caixas de medição do caudal excedente. 61

Figura 4.12 - Consolidação da zona final do sulco e caixas equipadas com sonda de ultra-sons. 62

Figura 4.13 - Recolha de amostras de água. 62

Figura 5.1 - Diferenças absolutas entre os declives, calculados antes e depois da realização das regas, para cada troço de 5 m de sulco, no Bloco 1. 67

Figura 5.2 - Diferenças absolutas entre os declives, calculados antes e depois da realização das regas, para cada troço de 5 m de sulco, no Bloco 2. 68

Figura 5.3 - Diferenças absolutas entre os declives, calculados antes e depois da realização das regas, para cada troço de 5 m de sulco, no Bloco 3. 68

Figura 5.4 - Representação gráfica dos perfis longitudinais dos sulcos do Bloco 1: no início representado pela linha azul e no fim do ensaio representado pela linha a preto. 69

Figura 5.5 - Representação gráfica dos perfis longitudinais dos sulcos do Bloco 2: no ínicio representado pela linha vermelha e no fim do ensaio representado pela linha a preto. 70

Figura 5.6 - Representação gráfica dos perfis longitudinais dos sulcos do Bloco 3: no início representados pela linha azul e no fim representados pela linha a preto. 71

Figura 5.7 - Comparação entre os tempos de avanço verificados durante as 3 regas realizadas no Bloco 1. 73

Figura 5.8 - Comparação entre os tempos de avanço verificados durante as 3 regas realizadas no Bloco 2. 74

Figura 5.9 - Comparação entre os tempos de avanço verificados durante as 4 regas realizadas no Bloco 3. 75

Figura 5.10 - Representação gráfica das equações de infiltração obtidas para o Bloco 1. 79

Figura 5.11 - Representação gráfica das equações de infiltração obtidas para o Bloco 2. 80

Figura 5.12 - Representação gráfica das equações de infiltração obtidas para o Bloco 3. 80

Figura 5.13 - Evolução da perda de sedimentos no Bloco 1. 83

Figura 5.14 - Evolução da perda de sedimentos no Bloco 2. 83

Figura 5.15 - Evolução da perda de sedimentos no Bloco 3. 84

Figura 5.16 - Localização das componentes no espaço. A vermelho representam-se os pontos do Bloco 1, a azul o Bloco 2 e a verde o Bloco 3. 85

Figura 5.17 - Perda de sedimentos. 87

Figura 5.18 - Comparação entre o avanço simulado pelo programa SIRMOD (representada a azul) e a curva de avanço real (representada a rosa) na 2ª rega do Bloco 1. 91

Figura 5.19 - Comparação entre o avanço simulado pelo programa SIRMOD (representada a azul) e a curva de avanço real (representada a rosa) na 2ª rega do Bloco 2. 91

Lista dos Quadros

Quadro 4.1 -Caracterização do complexo de troca. 44

Quadro 4.2 - Análise granulométrica e classifição textural. 45

Quadro 4.3 - Retenção da água no solo e densidade aparente. 46

Quadro 4.4 - Declive e comprimento de cada sulco. 50

Quadro 4.5 - Valores calculados para o caudal utilizando a fórmula de Criddle. 52

Quadro 5.1 - Evolução do declive longitudinal dos sulcos depois das 3 regas (calculado a partir da média dos declives dos vários troços de 5 m). 66

Quadro 5.2 - Parâmetros da equação de avanço $x = p\, t_x^r$. 72

Quadro 5.3 - Parâmetros da equação de avanço da rega realizada após a reabertura dos sulcos no Bloco 3. 76

Quadro 5.4 - Parâmetros da equação de Kostiakov $Z = k \cdot t^a$. 77

Quadro 5.5 - Parâmetros da equação de Kostiakov para rega realizada após a reabertura dos sulcos no Bloco 3. 78

Quadro 5.6 - Sedimentos arrastados por área (ton/ha) em cada sulco. 81

Quadro 5.7 - Resultados da análise das componentes principais. 85

Quadro 5.8 - Resultados da análise de variância. 86

Quadro 5.9 - Perda de sedimentos durante a 1ª rega. 87

Quadro 5.10 - Perda de sedimentos durante a 2ª rega. 88

Quadro 5.11 - Perda de sedimentos durante a 3ª rega. 88

Quadro 5.12 - Perda de sedimentos na rega realizada após a abertura dos sulcos. 88

Quadro 5.13 - Comparação entre os tempos de avanço observados e modelados com o programa SIRMOD. 90

Quadro 5.14 - Comparação entre os volumes observados e modelados com o programa SIRMOD. 92

Lista de Símbolos e Grandezas

Símbolo	*grandeza representada*	*dimensões*
a	expoente da equação de infiltração de Kostiakov	L^2
A	área da secção tranversal do escoamento	L^2
$\overline{A}$	área média da secção transversal do escoamento	L^2
A_m	área molhada da secção transversal	L^2
A_0	área normal na entrada da parcela	L^2
B	largura superficial do escoamento	L
c	coeficiente empírico da equação de Gardner e Laritzen, $Q_m = c \cdot S^d$	
C	condutividade do solo saturado	
C_u	coeficiente de Christiansen	
d	expoente da equação de Gardner e Laritzen, $Q_m = c \cdot S^d$	
D	dotação útil (de projecto)	L
$\overline{D_i}$	dotação média observada	L
e_a	eficiência de aplicação	
e_i	eficiência de infiltração	
ERM	erro relativo médio	
g	aceleração da gravidade	LT^{-2}
i	infiltrabilidade; taxa de infiltração	L^2T^{-1}
i_f	infiltrabilidade final	L^2T^{-1}
I	volume infiltrado (integral) por unidade de comprimento	L^2
k	parâmetro empírico da equação de infiltração de Kostiakov	$L^2T^{-(1+a)}$
L	comprimento do sulco	L
MAE	média absoluta do erro relativo	
n	coeficiente de rugosidade de Manning	$L^{-1/3}T$
N	número de observações	

Símbolo	*grandeza representada*	*dimensões*
p	parâmetro empírico da equação de avanço	
P_m	perímetro molhado do sulco da secção transversal	L
P_0	parâmetro empírico da equação do perímetro molhado	
Q	caudal	L^3T^{-1}
Q_0	modulo parcelar	L^3T^{-1}
Q_m	caudal máximo não erosivo	L^3T^{-1}
Q_x	caudal medido a uma distância x da cabeceira do sulco	L^3T^{-1}
r	Expoente da equação de avanço	
R	raio hidráulico da secção tranversal do escoamento	L
R_0	expoente da equação do perímetro molhado	
s	constante característica do solo utilizada na equação de Philip - "sorptivity"	$LT^{-1/2}$
S	perda de carga unitária	
S_0	declive do sulco	
S_f	declive da superfície livre da água	
t	tempo	T
t_a	tempo de alimentação	T
T_a	tempo necessário para a água avançar ao longo do comprimento do sulco	T
t_1	tempo de avanço na estação de controlo 1	T
t_2	tempo de avanço na estação de controlo 2	T
t_x	tempo de avanço para um ponto à distância x	T
t_{rx}	tempo de recessão para um ponto à distância x	T
UD	uniformidade de distribuição	
V	velocidade de escoamento	L^3
V_a	volume aplicado	L^3
V_f	volume final	L^3
V_i	volume infiltrado	L^3
V_{im}	volume infiltrado medido	L^3

Símbolo	*grandeza representada*	*dimensões*
V_{ic}	volume infiltrado calculado	L^3
V_p	volume percolado	L^3
V_u	volume útil	L^3
V_y	volume armazenado à superfície	L^3
V_z	volume infiltrado	L^3
x	distância de cada estação à cabeceira do sulco	L
y	profundidade de escoamento	L
Z	altura de água infiltrada	L
Z_{qi}	média dis n/4 menores valores observados de infiltração	L
$\overline{Z}$	infiltração média	L

Símbolos do Alfabeto Grego

Símbolo	*grandeza representada*	*dimensões*
τ	*tensão de arrastamento*	LMT^{-2}
τ_x	*tempo de infiltração para um ponto à distância x*	T
γ	*peso específico da água*	$L^{-2}MT^{-2}$
ρ_2, ρ_1	*parâmetros empíricos da geometria da secção transversal do sulco*	
σ_1, σ_2	*parâmetros empíricos da geometria da secção transversal do sulco*	
σ_y	*constante empirica designada por factor de forma superficial*	
σ_z	*factor de forma de infiltração, no modelo do balanço volumétrico*	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

A erosão do solo pela água constitui um factor importante na redução da fertilidade dos solos agrícolas com consequências na qualidade das águas dos rios, na sua navegabilidade e na reserva utilizável de água.

Dos métodos de rega mais generalizados os métodos de rega de superfície e por aspersão são os que apresentam maiores problemas de erosão.

Actualmente, em Portugal, a necessidade de baixar os custos de produção para tornar os nossos produtos competitivos a nível Europeu atribui um papel importante aos métodos de rega de superfície. A rega de superfície requer normalmente um investimento inicial mais baixo que os outros métodos. No entanto, nos casos em que a modelação do terreno é necessária para se obterem melhores eficiências, os custos elevam-se tornando mais competitivos os métodos de rega por aspersão e a rega localizada. Os gastos de exploração para os métodos de rega de superfície são também mais reduzidos.

A ondulação do terreno que caracteriza topograficamente o Alentejo, embora suave, impede normalmente a modelação do terreno, obrigando a que sejam as parcelas a adaptar-se ao terreno, para que tenham as condições óptimas da rega por sulcos. De facto, a aplanação da superfície do solo além de ser uma operação dispendiosa, é em muitos casos impraticável ou pelo menos desaconselhável, devido à remoção da camada superficial do solo, que apresenta normalmente pouca espessura e deixaria perto da superfície um horizonte B de baixa permeabilidade e grande resistência ao desenvolvimento radical. Estes aspectos vêm reduzir as vantagens da utilização de métodos de rega de superfície nestas zonas. Apesar de existirem, na rega por sulcos, soluções adaptadas às zonas de topografia ligeiramente ondulada que permitem boas condições de funcionamento, a sua execução exige um maior nível de conhecimentos sobre o processo de rega. Além disso, o reduzido investimento em equipamentos, exigido por estas soluções, não estimula a sua divulgação por parte de fabricantes e comerciantes, que são quem mais divulga outros métodos, em

que a aquisição de serviços técnicos constitui apenas um complemento da compra de equipamentos. Estas situações levam muitas vezes os agricultores a utilizar a solução mais aparente recorrendo a sistemas de rega por aspersão, que muitas vezes podem não corresponder à solução óptima nem em termos económicos, nem em termos técnicos, por exemplo no que se refere à defesa do solo contra a erosão.

Morgan, 1986, define prevenção da erosão como a aproximação da taxa de perda de solo aos valores que ocorrem em condições naturais. A prevenção da erosão do solo depende da escolha de estratégias adequadas de conservação do solo, o que implica um conhecimento exaustivo dos processos erosivos (Morgan, 1986).

1.2 Objectivos genéricos

Pretende-se com o presente trabalho contribuir para um melhor conhecimento dos mecanismos da erosão na rega por sulcos, nas condições específicas dos solos mediterrâneos, diagnosticando situações, para que trabalhos futuros possam apontar respostas que previnam ou solucionem situações de risco.

Pretende-se também avaliar os efeitos dum sistema alternativo, em que não se fazem movimentações de terras e a implantação dos sulcos tem em conta a facilidade da construção e das operações culturais na conservação do solo.

1.3 Objectivos específicos do estudo

Este estudo pretendeu avaliar uma situação de rega em terreno ondulado em que a implantação das linhas de cultura e dos sulcos de rega se determinou de modo a facilitar a sua construção e as operações culturais, sem ter em conta as limitações do declive. Reproduziu-se assim uma situação de utilização de rega por sulcos em terreno ondulado sem recorrer à modelação do terreno, nem à limitação sucessiva dos comprimentos e traçados dos sulcos.

No decorrer do trabalho foi feita uma avaliação da erosividade dos módulos parcelares utilizados para 3 situações de declive, através da recolha de sedimentos.

Outro dos objectivos do trabalho consistiu na utilização do modelo de simulação, ANREGA (Serralheiro, 1988) para a avaliação dos ensaios de rega efectuados e na validação do modelo SIRMOD (Utah State University Foudation,1989) para a situação em estudo.

CAPÍTULO 2

EROSÃO NA REGA POR SULCOS

2. Erosão na rega por sulcos

A maior parte dos trabalhos efectuados sobre os efeitos da erosão na produtividade dos solos tem sido realizada em solos não sujeitos a rega. Os primeiros estudos sobre a erosão nas parcelas regadas foram realizados nos anos 30, merecendo desde logo a rega por sulcos grande atenção (Aarstad e Miller, 1981). Taylor publicou em 1940 o primeiro estudo dedicado ao processo de erosão na rega por sulcos enumerando o declive, a taxa de escoamento e a distribuição do tamanho das partículas como parâmetros importantes no processo de erosão. Neste estudo, o autor apresentava também algumas indicações para minimizar a erosão (Koluvek, Tangi e Trout, 1993). São também de destacar os trabalhos realizados por Mech, 1949, em que o autor avalia o efeito do declive e do comprimento do sulco na erosão, referindo a erosão como a transferência de solo ao longo do sulco (Koluvek, Tangi e Trout, 1993). Na década de 70 a criação de legislação, nos E.U.A, sobre as descargas dos excedentes da rega provocou um aumento do interesse no estudo da erosão provocada pela rega. Inicialmente o objectivo principal dos estudos realizados era a qualidade da água e a remoção dos sedimentos dos excedentes da rega (Koluvek, Tangi e Trout, 1993; Aarstad e Miller, 1981).

2.1 *Factores que condicionam a erosão*

O escoamento resultante de situações de grande intensidade de precipitação constitui a causa de erosão mais comum (Kemper *et al.*,1985). Os processos de erosão pela água estão intimamente relacionados com os caminhos que a água percorre na sua passagem através do coberto vegetal e no seu movimento sobre a superfície do solo (Morgan,1986). Nas condições de rega por sulcos, a erosão é causada pelo escoamento da água sobre o solo, sob a forma de escoamento concentrado.

Os sulcos de rega são construidos com dois objectivos. O primeiro é permitir a entrada de água no solo de modo a satisfazer as necessidades das plantas, funcionando como uma superfície de infiltração. Em segundo lugar funciona como um canal de transporte que fornece água para a infiltração em toda a extensão do sulco. É ao satisfazer esta segunda função que a erosão ocorre, porque o caudal no início do sulco é suficiente para provocar a desagregação e o transporte das partículas de solo (Carter,1993).

A erosão do solo é um processo que acontece em duas fases, consistindo no destacamento de partículas individuais da massa de solo e no seu transporte por agentes erosivos como a água corrente e o vento (Morgan, 1986). A severidade da erosão depende da quantidade de material fornecido pelo destacamento e da capacidade dos agentes erosivos para o transportar (Morgan, 1986). Os dois processos, destacamento e transporte, dependem das propriedades do solo e das propriedades hidráulicas do escoamento: erodibilidade do solo, erosividade do escoamento, transportabilidade dos sedimentos e capacidade de transporte da corrente (Koluvek, Tangi e Trout,1993).

2.1.1 *Erodibilidade*

A erodibilidade do solo define-se como a susceptibilidade do solo à erosão e depende da sua textura, estabilidade dos agregados, capacidade de infiltração, teor de matéria orgânica e composição química (Morgan,1986). A interacção de todos estes factores

determina a resistência do solo ao humedecimento rápido, ao impacto das gotas de chuva e ao escoamento superficial.

A estabilidade dos agregados varia com a textura do solo (sobretudo com o teor de argila), a quantidade de matéria orgânica, a compactação, os iões adsorvidos, a composição química da água, o tempo e teor de humidade desde a última mobilização, o teor de humidade antes do humecimento e taxa de aplicação de água (Trout e Neibling,1993).

As partículas de maiores dimensões apresentam maior resistência ao transporte, enquanto as mais finas resistem ao destacamento devido à sua maior coesividade. As partículas de limo e a areia fina são as que apresentam menor resistência ao transporte. Embora alguns autores utilizem a percentagem de limo como um indicador de erodibilidade do solo, o uso da percentagem de argila é teoricamente mais correcto, já que são os agregados e torrões, resultantes da combinação das partículas de argila com a matéria orgânica, que determinam a resistência do solo à erosão (Morgan,1986).

A percentagem de minerais de base é outra característica que determina a resistência dos agregados, pois são estes que contribuem para a formação das ligações químicas entre as partículas de solo.

O humedecimento do solo enfraquece os agregados porque diminue a sua coesão, amolece os cimentos e provoca a sua expansão à medida que a água é absorvida pelas partículas de argila. O humedecimento rápido pode causar o colapso dos agregados. A estabilidade dos agregados depende do tipo de argilas presente. A presença de ilite e montmorilonite num solo acelera a formação de agregados, mas a sua estrutura mais aberta e a maior capacidade de aumentar e reduzir o seu volume com o humedecimento e a secagem torna os agregados mais instáveis que os formados com caulinite. No entanto, estas relações não são simples. Têm também que ser consideradas as complexas interacções entre a percentagem de água no solo e a composição química das partículas de argila e da água do solo (Morgan,1986).

Outro dos factores que influenciam a estabilidade dos agregados são os constituintes orgânicos e químicos do solo. Morgan, 1986, citando Evans, 1980, afirma que solos com menos de 2% de carbono orgânico (3,5% de matéria orgânica) podem ser considerados mais susceptiveis à erosão. As ligações devidas a materiais argilo-húmicos são responsáveis por

agregados menos consistentes no estado seco e húmido, mas mais estáveis em água, devido a irreversibilidade induzida, após secagem, pelos materiais húmicos (Costa, 1985).

A percentagem de sódio no complexo de troca é outro dos factores que determina a estabilidade dos agregados. À medida que a percentagem de sódio no complexo de troca aumenta, aumenta a absorção de água das argilas, a debilidade das ligações argilo-húmicas e a possibilidade do colapso dos agregados.

2.1.2 Erosividade

O indicador geralmente utilizado para traduzir a erosividade do escoamento é a força média de atrito (Trout e Neibling,1993). Utiliza-se a força média de atrito porque nos canais de terra a força de atrito, responsável pelo destacamento das partículas de solo, varia muito no tempo e no espaço, sendo por isso difícil de quantificar.

A partir da fase inicial do processo erosivo, são as forças de atrito as principais responsáveis pelo destacamento das partículas de solo e dos agregados no perímetro do sulco (Koluvek, Tangi e Trout, 1993). As forças hidrodinâmicas de levantamento e destacamento são exercidas pelo movimento da água nas zonas em que a água contacta com a superfície do sulco. A tensão de arrastamento é a força geralmente utilizada para avaliar o atrito médio exercido pelo escoamento no perímetro molhado (Trout e Neibling,1993). Segundo Duboys, 1879, e Graf, 1971, citados por Trout e Neibling, 1993, a tensão de arrastamento de um escoamento constante tem que igualar a componente da força da gravidade exercida sobre a água na direcção do escoamento, resultando na equação:

$$\tau = \gamma \cdot A \cdot \frac{S}{P_m} = \gamma \cdot R \cdot S \qquad (2.1)$$

em que τ é a tensão de arrastamento (N/m^2); γ é peso específico da água (9800 N/m^3); S é perda de carga, que é igual ao declive do sulco (m/m); A é a área da secção transversal (m^2); P_m é o perímetro molhado do sulco (m); R é o raio hidráulico, $R = A / P_m$ (m).

A velocidade de escoamento e a energia da corrente (stream power) são outros dos parâmetros hidráulicos que se relacionam com o atrito, utilizados para quantificar a erosividade do escoamento (Trout e Neibling,1993).

2.2 *Erosão, transporte e sedimentação na rega por sulcos*

Com o início da rega a água evolui no sulco molhando rapidamente a superfície do solo no fundo do sulco. Nesta fase inicial, o humedecimento rápido dos agregados existentes na superfície do sulco provoca a sua desintegração, fornecendo assim material para ser transportado pela corrente. Quando a água envolve os agregados o ar fica retido no seu interior e à medida que a água é conduzida ao centro dos agregados, por capilaridade, o ar é comprimido. O humedecimento enfraquece algumas das ligações entre as partículas que formam os agregados. Quando a pressão exercida pelo ar comprimido, no interior do agregado, excede as forças que promovem a ligação entre as partículas, os agregados desintegram-se. Processos semelhantes tranformam os agregados de maiores dimensões em agregados mais pequenos (Brown *et al.*, 1988).

Depois desta fase inicial, o destacamento das partículas de solo e dos agregados do perímetro molhado é basicamente função das forças de atrito exercidas pelo escoamento (Koluvek *et al.*,1993). A água corrente exerce forças hidrodinâmicas de levantamento e arrastamento nas margens da torrente que podem destacar e transportar as partículas de solo (Trout e Neibling,1993).

A força de atrito aumenta com a velocidade do escoamento, provocando destacamento à medida que atinge o valor crítico necessário para vencer as forças de coesão entre os agregados, as partículas e o solo (Foster e Lane, 1983 citado por Kemper *et al.*,1985). Este valor é muito baixo para as partículas destacadas pelas bolhas de ar, libertadas com o humedecimento rápido do solo pelo avanço da água, e muito elevado para partículas que estão fortemente ligadas às partículas vizinhas e são humedecidas por capilaridade (Kemper *et al.*,1985).

Nas paredes do sulco, é o efeito combinado das forças de atrito, provocadas pelo

movimento da água, e das forças gravitacionais, o responsável pela desagregação e arrastamento das partículas de solo. Com o evoluir do processo erosivo e o contínuo destacamento das partículas, as paredes do sulco em contacto com a água são escavadas, deixando sem apoio as zonas do perfil acima do perímetro molhado que, ao serem humedecidas por capilaridade, não resistem à força da gravidade e se precipitam no sulco (Brown *et al.*, 1988). Ao cair no sulco, a massa de solo desagrega-se em pequenas partículas que são imediatamente arrastadas pela torrente e em agregados que se depositam no fundo do sulco (Trout e Neibling,1993).

O efeito contínuo das forças de atrito, desenvolvidas pelo escoamento, no perímetro molhado, faz evoluir o perfil tranversal do sulco até atingir uma forma estável, a partir da qual apenas se alteram as dimensões do perfil com a variação das condições hidráulicas do escoamento (Trout,1991). A erosão continua a uma taxa uniforme, até atingir uma camada de solo menos erodível, rebaixando a superfície do sulco e alargando o perfil. Na zona central de muitos sulcos a erosão das paredes do sulco e a deposição no fundo dos sulcos ocorre simultaneamente (Brown *et al*, 1988).

Nas situações em que se verifica um aumento pontual da força de atrito, a superfície do sulco é escavada criando um pequeno ressalto. A energia cinética, resultante da queda da água, solta e quebra os agregados na zona de impacto da água. Forma-se assim uma concavidade onde a turbulência da água vai escavando o solo que suporta a camada superficial, provocando o seu desmoronamento e a evolução do corte na direcção da cabeceira do sulco, produzindo grande quantidade de sedimentos que são rapidamente arrastados (Brown *et al.*, 1988; Trout e Neibling,1993). Brown *et al.*, 1988, referem que este processo ocorre quando os sulcos apresentam um declive superior a 1%.

Trout e Neibling, 1993, referem, citando vários autores, o decréscimo na descarga de sedimentos com o evoluir do processo erosivo, afirmando que a elevada perda inicial de sedimentos se deve, provavelmente, ao movimento de partículas soltas, deixadas pela mobilização ou pela deposição em regas anteriores e de partículas soltas resultantes do colapso dos agregados, que são rápidamente humedecidos. Depois desta fase inicial a erodibilidade do solo decresce.

Durante o transporte os sedimentos contribuem para o aumento das partículas em

suspensão (Brown *et al.*, 1988). Ao saltarem, destacam pequenas partículas do seu próprio perímetro e da superfície do sulco. E, ao rolarem, criam subpressões que levantam as partículas de limo e de argila, contribuindo para o aumento da carga de sedimentos em suspensão.

A erosão do solo engloba, além do destacamento de partículas, o seu transporte pelos agentes erosivos (Morgan,1986). Uma parte dos sedimentos transportados desloca-se rolando, deslizando e saltando ao longo do fundo do sulco (bed load). O seu movimento depende inicialmente da capacidade de destacamento do escoamento, traduzida normalmente pela força de atrito, e da capacidade de arrastamento da corrente. A restante carga de sedimentos é transportada em supensão (suspended load). A concentração de partículas em suspensão depende da conjugação, sobre elas, dos efeitos das componentes verticais das forças de turbulência e da força da gravidade. As partículas mantêm-se em suspensão enquanto a velocidade do escoamento turbulento for superior à velocidade de deposição das partículas. Assim, a capacidade de carga das partículas em suspensão depende da turbulência do escoamento, da rugosidade do sulco, do tamanho, forma e densidade das partículas e da viscosidade do fluido (Trout e Neibling,1993).

A distância a que os sedimentos são transportados depende do tamanho das partículas de sedimentos e dos agregados, da sua densidade e da capacidade de transporte da corrente.

Trout e Neibling, 1993, definem capacidade de transporte de uma corrente como sendo a concentração máxima de sedimentos que seria atingida num canal longo e uniforme. Foster, 1992, define como o limite de transporte da corrente o ponto em que a quantidade de sedimentos disponível para o transporte iguala a capacidade de transporte da corrente (Hairsine et al., 1992).

É normalmente difícil determinar qual dos processos, erosão ou capacidade de transporte, controla o movimento dos sedimentos num canal. Na rega por sulcos é normalmente a capacidade de transporte que limita o transporte em canais longos, já que o caudal diminui com a distância à cabeceira do sulco. Para avaliar e interpretar os dados de erosão é essencial saber qual dos processos domina. Se é o processo de destacamento o mais importante, são factores determinantes as condições de declive, caudal, comprimento

do sulco e erodibilidade do solo. Nos casos em que é a capacidade de transporte o processo limitante no transporte das partículas, são factores determinantes as condições de escoamento no ponto de recolha dos sedimentos e o tamanho e densidade das partículas que compõem o sedimento (Koluvek *et al.*,1993).

Uma das caracteristicas da rega por sulcos é a diminuição do caudal ao longo do sulco à medida que a água se infiltra. Com a diminuição do caudal, a capacidade de transporte torna-se limitante, criando-se condições para a deposição das partículas de maiores dimensões, o que resulta na redução do tamanho das partículas transportadas. Durante o transporte, as partículas que se deslocam rolando e saltando no fundo do sulco desagregam-se em partículas mais pequenas, reduzindo também o tamanho médio das partículas transportadas. Assim, a redução da capacidade de transporte da corrente é, muitas vezes, compensada pelo aumento da transportabilidade dos sedimentos resultante da redução do tamanho das partículas com a distância de transporte (Trout e Neibling,1993).

A erosão é um processo dinâmico, que envolve o destacamento de sedimentos e a sua devolução à superfície do solo (Hairsine *et al.*, 1992) , não acontecendo de modo contínuo ao longo do sulco, existindo zonas onde não há deposição e outras em que a camada de sedimentos depositada sofre também erosão.

Na rega por sulcos a água absorvida arrasta consigo os sedimentos mais finos que se depositam no perímetro do sulco formando uma camada de baixa permeabilidade e provocando o aumento da tensão superficial da água do solo. A tensão superficial mantém as partículas agarradas à superfície do solo, contribuindo, com o tempo, para a estabilização do perímetro e para a diminuição da erodibilidade do solo (Brown *et al.*, 1988). Estas alterações da estrutura superficial do solo funcionam como defesa contra a erosão.

Os canais de terra não apresentam uma superfície regular, o que provoca a variação da velocidade e da força de atrito ao longo do sulco. Tal como o destacamento, também a deposição dos sedimentos é determinada pelo carácter aleatório da intensidade das forças hidrodinâmicas, típicas dos escoamentos turbulentos.

Além da irregularidade original, o fundo do sulco é modelado pelo escoamento, como resultado do arrastamento e da deposição de sedimentos, adquirindo sucessivamente várias configurações.

Os agregados transportados pela corrente rolam e saltam ao longo da superfície do sulco até encontrarem zonas protegidas por agregados ou por "dunas" que se formam no fundo dos sulcos, ou em pequenas depressões, onde a velocidade de escoamento é menor. Estes processos permitem a deposição dos sedimentos mesmo que o limite da capacidade de transporte não tenha sido atingido. Brown *et al.*, 1988, descrevem situações em que este fenómeno é tão eficaz que não se observa qualquer carga de sedimentos depois do escoamento ter ultrapassado estas formações.

A deposição gradual dos sedimentos contribui para o alisamento da superfície dos sulcos (Trout e Neibling,1993). Estes autores afirmam que, com o aumento da concentração de sedimentos no escoamento, aumenta a probabilidade de deposição pelos processos acima descritos. Verifica-se, assim, um decréscimo da erosão líquida (=destacamento - deposição) à medida que a carga de sedimentos aumenta e se aproxima assimptoticamente da capacidade de transporte dum canal com escoamento uniforme (Trout e Neibling,1993).

Com as sucessivas regas, o perfil longitudinal do sulco sofre uma regularização, o solo é destacado nas zonas mais declivosas do sulco e depositado nas zonas mais planas. Trout e Neibling, 1993, chamam a este processo "nivelamento hidráulico".

Hairsine *et al.*, 1992, sublinham as diferenças existentes entre a erosão da superfície original do sulco e a erosão da camada de sedimentos que se deposita durante a rega, no decorrer do mesmo processo erosivo. A energia específica necessária para remover os sedimentos depositados durante a rega é menor, já que o tempo disponível para a formação de ligações entre os sedimentos depositados e os agregados vizinhos é reduzido.

Uma parte dos sedimentos em supensão, que não ficam adsorvidos na superfície do sulco, deixa o sulco com o escoamento final (Brown *et al*, 1988). No entanto, a quantidade de sedimentos recolhida no fim do sulco, com o escoamento final, não representa o movimento dos sedimentos ao longo do seu comprimento. A erosão que ocorre na parte inicial fica, em grande parte, retida ao longo do sulco. Podem verificar-se niveis de erosão significativos, na zona inicial do sulco, sem que a recolha de sedimentos no fim o traduza (Carter,1993).

2.3 Factores que influenciam o destacamento, o transporte e a sedimentação.

Os processos de destacamento, transporte e sedimentação são complexos e influenciados por muitos factores. O declive, o caudal, o comprimento do sulco, a rugosidade, as mobilizações, o número de regas e a presença de resíduos ou plantas no sulco são factores que determinam onde e quando estes processos acontecem (Carter,1993).

2.3.1 Declive

O aumento do declive provoca o aumenta da velocidade do escoamento permitindo a desagregação e o transporte de sedimentos de maiores dimensões do perímetro do sulco (Meyer e Harmon,1984). Através da capacidade de transporte o declive vai influenciar a percentagem de sedimentos, dos diferentes grupos texturais, que sofre transporte e deposição e a sua distribuição ao longo do sulco. Meyer *et al.,* 1983, afirmam que o efeito do declive no aumento da capacidade de transporte é maior que o efeito do caudal. Nos sulcos com declive suave é a capacidade de transporte e não a desagregação o factor que limita a perda de solo nos sulcos (Meyer *et al.*,1983). Nos sulcos que apresentam maior declive a percentagem de argila no total dos sedimentos arrastados é menor. As alterações do declive ao longo do sulco determinam também as zonas de destacamento e deposição, limitando muitas vezes a capacidade de transporte do escoamento.

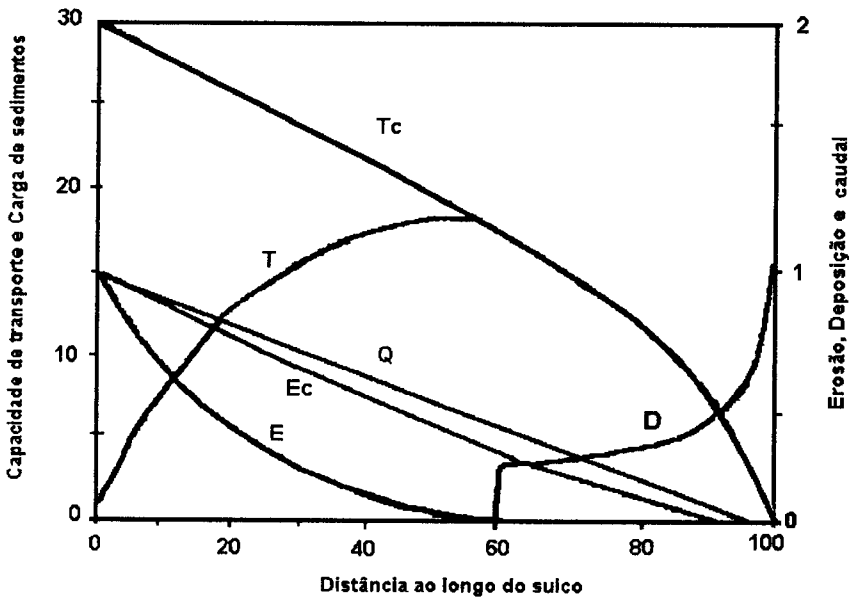


Figura 2.1 - Variação do escoamento (Q), da taxa de erosão (E), da capacidade erosiva (E_C), da carga de sedimentos transportada (T), da capacidade de transporte (T_C) e da deposição (D) com a distância ao longo do sulco com declive constante.

(adaptado deTrout e Neibling,1993).

A Figura 2.1 descreve o comportamento da erosão, da capacidade de transporte e da sedimentação ao longo do sulco para uma situação em que o declive é uniforme. Ao longo do sulco, o transporte de sedimentos aumenta até atingir a capacidade de transporte; a partir deste ponto a erosão líquida termina e inícia-se a deposição. Com o aumento da carga de sedimentos a taxa de erosão diminui, embora a capacidade erosiva diminua mais lentamente, acompanhando o caudal. Nas situações em que há uma diminuição brusca do declive a meio do sulco, esta quebra reduz a capacidade de transporte, provocando a deposição de grande quantidade de sedimentos. Quando o declive aumenta a meio do sulco, regista-se um aumento da capacidade de transporte e da capacidade erosiva da corrente e consequentemente a da erosão que se prolonga até a redução do caudal limitar a capacidade de transporte e provocar a deposição dos sedimentos (Trout e Neibling,1993).

2.3.2 Caudal

A perda total de solo numa rega é função do caudal, da concentração de sedimentos e da duração do escoamento. Ao contrário do que acontece na erosão pela chuva, o escoamento na rega pode ser controlado através da gestão adequada da rega. Assim, a condução da rega deve evitar perdas de água desnecessárias no fim do sulco para evitar perdas de solo (Carrol *et al.*,1995). A utilização de um caudal adaptado às condições de infiltração do solo e ao declive constitui uma das formas de evitar as perdas de água. Podem adaptar-se os caudais às características do solo, utilizando caudais mais reduzidos na primeira rega, quando o solo apresenta maior susceptibilidade à erosão devido à mobilização recente (Carrol *et al.*,1995).

Trabalhos realizados por Kemper *et al.*, 1985, mostram que taxas de humedecimento mais rápidas provocam uma maior erosão. O humedecimento rápido do solo é responsável pelo colapso dos agregados e consequentemente pelo aumento da erosão. As partículas resultantes da quebra dos agregados são mais pequenas e por isso mais fáceis de transportar. Além disso, devido ao seu reduzido tamanho tapam os poros, provocando a redução da taxa de infiltração. Com a redução da infiltração aumenta o escoamento e a força de atrito exercida sobre o perímetro do sulco. O humedecimento lento da superfície do sulco diminui a erosão mas aumenta as diferenças dos tempos de infiltração entre a parte inicial e a parte final do sulco.

Pode definir-se caudal não erosivo como o caudal que não provoca erosão. Dos vários factores que determinam a erosividade de um caudal, o declive e o tipo de solo são os mais importantes (Hamad e Stringham, 1978).

A primeira equação que permite determinar o caudal máximo não erosivo para determinado declive foi publicada em forma de gráfico por Lawrence, 1953, e baseava-se em estudos realizados por W. D. Criddle no início dos anos 50 (Hamad e Stringham, 1978 e Koluvek *et al.*,1993):

$$Q_m = 0.63/S \qquad (2.2)$$

em que Q_m é o caudal máximo não erosivo, expresso em $l \cdot s^{-1}$, para o declive S.

Hamad e Stringham, 1978, voltaram a analizar os dados obtidos por Criddle utilizando a equação sugerida por Gardner e Laritzen, 1949,

$$Q_m = c \cdot S^d \qquad (2.3)$$

em que *c* e *d* são coeficientes empíricos. Calcularam os coeficientes para 6 tipos de solos, concluindo que com a primeira equação se obtêm valores de Q_m mais elevados para declives superiores a 1%.

2.3.3 Comprimento do sulco

Considera-se normalmente que a construção de sulcos mais longos melhora a eficiência de aplicação e reduz os custos de mão de obra e os desperdícios de água.

Carrol *et al.,* 1995, compararam a concentração de sedimentos no escoamento final em sulcos de comprimentos diferentes, verificando que não existiam diferenças significativas entre os sulcos de maior e menor comprimento.

Na rega por sulcos a erosão ocorre ao longo do sulco aumentando na parte final, verificando-se que o maior comprimento não reduz a erosão ao longo do sulco (Mech, 1949, citado por Carrol *et al.*, 1995)

A infiltração ao longo dos sulcos longos reduz o pico de escoamento no fim do sulco e o escoamento total, significando perda de solo na parte final do sulco ligeiramente menor. No entanto, menor perda de solo no fim do sulco não significa que a erosão ao longo do sulco seja menor (Carrol *et al.*,1995).

Nos sulcos longos, o aumento da área de fornecimento de sedimentos não é acompanhado pelo aumento da capacidade de transporte devido ao aumento do caudal. Assim, a capacidade de transporte por unidade de área não aumenta muito com o comprimento dos sulcos (Meyer *et al.*,1983).

2.3.4 Rugosidade

As características da superfície são o reflexo da estrutura do solo e do tratamento aplicado a essa superfície. A erosão modifica a forma da superfície do solo, o retorno de efeitos (feedback) destas alterações afecta o escoamento e, de novo, a erosão (Hairsine *et al.*, 1992).

Pode definir-se rugosidade hidráulica como a resistência oferecida pela superfície do solo ao movimento da água (Hairsine *et al.*, 1992)

Foster *et al.*, 1984, citados por Hairsine *et al.*, 1992, consideram duas formas de rugosidade. A variação da elevação da superfície do solo numa escala semelhante à das partículas e dos agregados que resistem ao humedecimento. E a variação da superfície do solo superior à anterior.

A microtopografia do solo é a principal responsável pela resistência ao escoamento. Dependendo das características do escoamento (que definem situações de arrastamento ou de deposição) e da concentração de material sólido, podem formar-se pequenas ondulações, a que se chamam "rugas", ou ondulações maiores, a que se chamam "dunas". Formam-se, por vezes "bancos", formações superiores a dunas e a rugas, que se dispõem num e noutro lado do sulco criando, quando o caudal é reduzido, um leito preferencial, para o escoamento do caudal, dentro do próprio sulco. Este leito evolui como se se tratasse de um curso de água em escala reduzida.

Nos sulcos, estas duas formas de rugosidade influenciam a profundidade e a velocidade do escoamento. Um aumento da rugosidade reduz a distância de transporte a que uma particula, destacada da superfície do sulco, é transportada, reduzindo assim o fluxo de sedimentos. Um aumento da rugosidade provoca um aumento da profundidade do escoamento e uma redução da velocidade, diminuindo as forças de atrito.

2.3.4.1 Presença de resíduos ou plantas

A redução da erosão através da aplicação de resíduos de plantas tem sido referida por vários autores. Normalmente os sulcos são preparados para a rega livres de resíduos ou de plantas. Aarstad e Miller, 1981, observaram que a presença de resíduos de milho nos sulcos de rega quase eliminavam a erosão e a turbidez do escoamento final.

Trabalhos realizados pelos mesmos autores com a aplicação de palha na superfície dos sulcos, permitiram verificar que a presença de resíduos provoca um aumento da infiltração e a consequente redução da velocidade do escoamento final e dos sedimentos em suspensão. O aumento do perímetro molhado, resultante da redução da velocidade da água provocada pela presença de resíduos, foi o responsável pelo aumento da infiltração. A presença de resíduos também reduziu a erosão ao longo do sulco, embora o seu efeito na zona inicial do sulco tenha sido quase nulo. Para jusante, com a redução do caudal devido à infiltração, a velocidade do caudal diminui provocando a deposição das partículas de maiores dimensões. A conservação dos resíduos à superfície do solo pode ser conseguida com a adopção de técnicas de mobilização mínima na preparação do solo e na sementeira.

2.3.5 Mobilização

Com a mobilização ou compactação do solo grande parte das ligações que mantêm os agregados são quebradas. Quando o solo apresenta um reduzido teor de humidade as ligações entre as partículas de solo reconstituem-se fortalecendo-se com o tempo. Assim, o espaçamento entre as mobilizações e a rega é importante porque permite o fortalecimento das ligações entre as partículas do solo, aumentando a estabilidade dos agregados (Kemper *et al*,1985).

2.3.6 *Número de regas*

Ao longo do periodo de rega o solo apresenta uma grande variabilidade na sua susceptibilidade à erosão. A taxa de erosão é mais elevada na primeira rega, quando os sulcos foram recentemente abertos e a camada superficial do solo ainda se encontra muito solta.

Kinnel, 1994, descreve a deposição de sedimentos que ocontece ao longo do sulco como uma "camada dinâmica de deposição", com uma erodibilidade também dinâmica que varia frequentemente entre dois extremos (Carrol *et al.*,1995). Os sedimentos que formam esta camada constituem uma fonte de material que pode ser facilmente arrastado na rega seguinte,.

Nas últimas regas é notório o declínio da concentração de sedimentos, apesar do caudal de saída no fim do sulco ser mais elevado (Carrol *et al.*,1995).

O teor de humidade no solo é concerteza um dos responsáveis por esta redução. Solos que apresentam algum teor de humidade antes do início da rega sofrem menos erosão devido à maior estabilidade dos seus agregados (Kemper *et al*,1985).

2.4 *Efeito da erosão na produtividade do solo*

Resultado final do processo de erosão, na rega por sulcos, é a remoção da superfície do solo das zonas superiores do sulco, a deposição de parte desta carga nas zonas inferiores e a perda de solo da parcela (Carter, 1993).

Com o continuar do processo a altura da camada superficial do solo diminui na parte superior do sulco e ao longo do perfil, numa extensão que depende do declive, do módulo parcelar, das práticas culturais e da rega (Carter,1993). Esta remoção da camada superficial do solo provoca uma diminuição da sua produtividade. A extensão da redução da produtividade depende da produtividade relativa da camada superficial do solo e da inferior. Se a diferença entre a produtividade destas duas camadas não for significativa o efeito da erosão não é importante. Mas nos solos em que a produtividade da camada inferior é muito

menor que a da camada superficial as consequências da erosão tornam-se muito graves (Carter, 1993).

Estudos realizados por Carter, 1993, mostram que as reduções de produção provocadas pela erosão, resultantes da rega por sulcos, são permanentes. As camadas inferiores do solo não apresentam o mesmo nível de produtividade e não existe tecnologia disponível para inverter a situação

A movimentação dos sedimentos ao longo do sulco tem consequências nefastas. A deposição das partículas transportadas pelo escoamento cria ao longo do sulco uma diferença textural, formando zonas de acumulação de partículas mais finas e zonas onde se depositam agregados de maiores dimensões. A deposição das partículas de argila forma uma camada superficial de fraca permeabilidade e muito densa, que se designa normalmente por crosta. A formação da crosta diminui a capacidade de infiltração do solo provocando um aumento do caudal no sulco e consequentemente um aumento do potencial erosivo. O arrastamento das partículas de argila diminui também a capacidade do solo para reter água.

A repetição destes processos ao longo da época de rega vai provocar uma diferenciação entre as zonas de arrastamento e as zonas de deposição, criando diferenças em termos de fertilidade do solo, de infiltração e de agregação (já que a migração mais rápida é a das partículas de argila). Esta desigualdade ao longo dos sulcos é ampliada para a parcela com consequências na uniformidade da rega e finalmente na produção.

CAPÍTULO 3

MODELAÇÃO DA REGA DE SUPERFÍCIE E CARACTERIZAÇÃO DA INFILTRAÇÃO EM SULCOS

3. Modelação da rega de superfície e caracterização da infiltração em sulcos

Os processos de rega de superfície resultam da combinação do escoamento da água na superfície do solo com a sua infiltração no perfil, fazendo depender os desempenhos do sistema da combinação das características do escoamento superficial e da capacidade de infiltração do solo.

Nas últimas décadas têm-se verificado avanços significativos na compreensão dos princípios físicos que se aplicam à rega de superfície e na sua descrição matemática (Katopodes *et al.*, 1990). A partir do conhecimento dos processos de resolução das equações de Saint-Venant e com o desenvolvimento da capacidade de cálculo dos computadores verificou-se uma evolução no conhecimento matemático das relações que governam o processo de rega. Como resultado desta evolução temos hoje à disposição vários tipos de modelos computacionais que simulam os aspectos físicos das várias fases da rega.

3.1 Modelação matemática do escoamento

O escoamento da água na superfície do solo durante a rega é descrito pelas equações de Saint-Venant: equação da continuidade e equação da quantidade de movimento. Estas equações resultam da aplicação da Lei da Conservação da Massa e da Segunda Lei de Newton às condições de escoamento em regime variável que se verificam na rega de superfície.

A equação da continuidade ou equação da conservação da massa pode ser representada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \qquad (3.1)$$

Da aplicação da Segunda Lei de Newton resulta a equação da quantidade de movimento que traduz o equilibrio dinâmico do processo de escoamento e pode ser apresentada com a seguinte forma:

$$\frac{1}{g}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{iV}{gA} \qquad (3.2)$$

onde,

A - área da secção transversal do escoamento;

Q - caudal;

t - tempo;

x - distância medida na direcção do escoamento;

I - volume infiltrado por unidade de comprimento;

i - taxa de infiltração;

g - aceleração da gravidade;

S_0 - declive do sulco;

S_f - declive da superfície livre da água;

V - velocidade do escoamento;

y - profundidade do escoamento.

As equações de Saint-Venant são equações diferenciais parciais de difícil resolução analítica. Só em 1970 Strelkoff apresentou um método que permite a sua resolução numérica. Desde então vários autores têm definido esquemas que permitem a resolução aproximada destas equações. As simplificações introduzidas na resolução das equações de Saint-Venant determinaram o aparecimento de diversos tipos de modelo matemáticos do escoamento.

A modelação matemática do escoamento consiste na determinação das características do escoamento ao longo do espaço e do tempo. O que se consegue com a resolução repetida das equações de Saint-Venant utilizando um número elevado de pares de valores espaço-tempo que traduzem a evolução da água na parcela de rega (Serralheiro, 1988 e 1996).

Os modelos que utilizam as equações de Saint-Venant para simular a rega de superficie são designados por modelos hidrodinâmicos e têm sido desenvolvidos por autores como - Basset, 1972, Kincaid *et al.*, 1972, Strelkof e Katapodes,1977, Souza, 1981, Elliot e Walker, 1982, e Haie, 1984 (James, 1988). Os modelos desenvolvidos pelos diversos autores diferem essencialmente no algoritmo sugerido para as equações de Saint-Venant. Em todos os modelos a equação da continuidade é utilizada sem alterações para determinar o armazenamento superfical. As simplificações são aplicadas na equação da quantidade de movimento.

3.1.1 Modelo hidrodinâmico completo

Neste modelo as equações do escoamento são resolvidas sem recorrer a qualquer aproximação simplificativa. Para resolver as equações recorre-se normalmente ao método das características que é também utilizado por outros modelos. Este método consiste na divisão das equações por parâmetros característicos de modo a tornar as equações adimensionais, reduzindo depois o número de termos por combinação. Consegue-se assim reduzir o número de "imputs" necessários ao modelo e convertem-se as equações em equações diferencias ordinárias, que têm solução através da aplicação de métodos numéricos.

Outra das soluções encontradas para a resolução das equações do escoamento, no caso dos sulcos, foi aplicada por Souza, 1981, e é designado por "volume deformável de controlo". Esta ténica considera células de fluído que se formam a montante e se deslocam para jusante ao mesmo tempo que se deformam (Serralheiro, 1988 e 1996).

3.1.2 Modelo de inércia nula

Para velocidades de escoamento baixas, como as normalmente encontradas na rega de superfície, as alterações da velocidade do escoamento são de tal modo reduzidas que podem ser desprezadas. O que permite anular todos os termos inerciais da equação da quantidade de movimento ficando a equação reduzida à forma:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \qquad (3.3)$$

que simplifica bastante a resolução.

Este modelo foi desenvolvido por Strelkoff e Katopodes, 1977, para a rega por faixas e adaptado à rega por sulcos por Elliot *et al.*,1982 (Elliot e Walker, 1983).

3.1.3 Modelo da onda cinemática

Neste modelo é ignorada a variação da profundidade da água $\partial y/\partial x$ na equação da quantidade de movimento, verificando-se assim uma relação única entre o caudal e as dimensões da secção transversal do escoamento que é traduzida por uma das equações característica do escoamento uniforme, utilizando-se normalmente a equação de Manning. Esta equação substitui a equação da quantidade de movimento.

Esta simplificação limita a aplicação do modelo a sulcos e faixas de escoamento livre com declives diferentes de zero. Strelkoff e Katopodes, 1977, verificaram que este modelo simula melhor as condições de escoamento nas situações em que o declive longitudinal é mais elevado (James, 1988).

3.1.4 Modelo do balanço volumétrico

O modelo do balanço volumétrico constitui outra aproximação importante à modelação da rega de superfície. Este modelo não considera a equação da quantidade de movimento, admitindo que a área média da secção transversal se mantém constante ao longo do escoamento (Serralheiro,1988 e 1996):

$$\overline{A} = \sigma_y \, A_0 \tag{3.4}$$

onde ,

$\overline{A}$ - área média da secção tranversal,

A_0 - *área normal na entrada da parcela*

σ_y - constante empírica designada por factor de forma superficial.

A equação da continuidade expressa em termos de volume assume a seguinte forma:

$$Q_0 \cdot t = V_y(t) + V_z(t) \quad \text{para} \quad t \leq T_a \tag{3.5}$$

onde,

Q_0 - módulo parcelar;

t - tempo decorrido desde o início da rega;

T_a - tempo necessário para a água avançar ao longo do comprimento do sulco;

$V_y(t)$ - volume de água na superfície do solo;

$V_z(t)$ - volume de água infiltrado no tempo t .

Demonstrando que o volume fornecido à parcela é igual à soma do volume armazenado na superfície do solo e do volume infiltrado durante o periodo de tempo t.

Este modelo, apesar das simplificações introduzidas, apresenta resultados satisfatórios para muitas situações, incluindo a aplicação ao projecto de sistemas.

3.2 *A infiltração na rega por sulcos*

Nos sistemas de rega por escorrimento a infiltração é o factor que afecta mais directamente o desempenho da rega, uma vez que o avanço da toalha de água sobre o solo depende da infiltração.

Na rega por sulcos as condições de infiltração diferem das condições dos outros métodos de rega de superfície. A maior complexidade da superfície dos sulcos introduz dificuldades adicionais no estudo hidráulico das diferentes fases da rega e na análise da infiltração. A superfície do solo não horizontal permite que a água de rega se infiltre verticalmente e também lateralmente. Esta diferença entre a infiltração nos sulcos e em parcelas de rega como as faixas e os canteiros faz depender a infiltrabilidade da profundidade da toalha de água nos sulcos, ou seja, confere à geometria do sulco um papel importante na definição da superfície efectivamente infiltrante (Serralheiro, 1996).

3.2.1 *Factores que afectam a infiltração*

Factores como o caudal, o declive, a rugosidade e a geometria do sulco influenciam a profundidade de escoamento e consequentemente o perímetro molhado, ao longo do sulco e durante o periodo de rega. O perímetro molhado, a profundidade de escoamento e a sua variação no tempo e no espaço afectam a infiltração (Izadi e Wallender, 1985). A infiltração é também influenciada por outros factores como a humidade do solo antes da rega, a existência de fendas, a heterogenidade do solo, a formação de crosta e a qualidade da água. Além das variações da infiltração resultantes de condições inerentes ao solo, o processo de rega cria uma variação espacial que pode afectar a capacidade de infiltração; factores como o perímetro molhado e a velocidade de escoamento variam ao longo do sulco e podem influenciar a infiltração (Trout,1992).

A altura do escoamento exerce uma influência muito importante na definição da área da superfície em que ocorre a infiltração e consequentemente no volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco (Strelkoff e Souza, 1984)

Samani *et al,* 1985, citado por Scalopi *et al.*, 1995, através de um estudo realizado com um modelo computacional verificaram a existência de uma correlação positiva entre a profundidade do escoamento, o perímetro molhado e a infiltração. Assim, nas condições em que a profundidade de escoamento diminui ao longo do sulco podemos esperar uma redução do volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco, proporcional à redução da profundidade de escoamento. Esta influência do perímetro molhado na quantidade de água infiltrada ao longo do sulco tem sido verificada por vários autores. Fangmeier e Ramsey, 1978, referem que o volume infiltrado tem uma relação linear com o perímetro molhado. Izadi e Wallender, 1985, afirmam que a influência do perímetro molhado no volume infiltrado é maior no início do processo de infiltração, quando o volume pode ser calculado como o produto da área molhada pela velocidade de infiltração. Depois a variabilidade do solo passa a desempenhar um papel mais importante na variação da infiltração, o que conduz à redução da influência do perímetro molhado com o tempo.

Trout, 1992, afirma que a infiltração em sulcos em que as condições de solo são homogéneas deve aumentar com o perímetro molhado a uma taxa decrescente. Só nos casos em que a permeabilidade do solo, nas paredes do sulco, é maior que no fundo do sulco se pode esperar que a infiltração aumente a uma taxa crescente com o perímetro molhado. Estas condições podem ocorrer quando a deposição de sedimentos no fundo do sulco provoca a formação de uma crosta, enquanto o deslizamento das paredes do sulco mantêm a superfície mais permeável.

As alterações da geometria do sulco provocadas pelo destacamento e deposição das partículas de solo também influenciam indirectamente a infiltração através da profundidade de escoamento, do perímetro molhado e da velocidade de infiltração (Izadi e Wallender, 1985).

A taxa de infiltração nos sulcos pode ser largamente afectada pela crosta que se forma à superfície. A teoria da erosão prevê que os sedimentos desagregados e assim as partículas de sedimentos disponíveis para formar crosta, aumentem com o atrito provocado pelo movimento da água que está relacionado com o quadrado da velocidade de escoamento (Trout e Neibling,1993). Eisenhauer *et al.*, 1983, ao realizarem testes com canaletes em laboratório verificaram que o ritmo de formação da crosta aumenta com a

velocidade do escoamento. Brown *et al.*, 1988, também referem que o aumento da velocidade de escoamento acelera a formação de crosta que provoca a diminuição da infiltração. A infiltração relaciona-se assim inversamente com a velocidade de escoamento.

Como a velocidade de escoamento e o perímetro molhado aumentam com a taxa de escoamento, os seus efeitos contrários sobre a infiltração podem resultar num efeito aparente reduzido, quando as taxas de escoamento se modificam. Estas interacções fortalecem a relação inversa existente entre a infiltração e o declive do sulco (Trout,1992).

O efeito da velocidade de escoamento sobre a infiltração pode ser reduzido até que seja atingido um valor crítico com energia suficiente para mover as partículas de solo. À medida que aumenta a velocidade de escoamento, o movimento das partículas e a formação de crosta, a infiltração diminui. A velocidade elevada, a taxa a que a infiltração decresce diminui e a infiltração aproxima-se de um valor base. Estas alterações acontecem porque o aumento da espessura da crosta que resulta na redução da infiltração diminui e porque o aumento da velocidade amplia a capacidade de transporte do sedimento e reduz a deposição das partículas finas. O movimento dos sedimentos e a formação de crosta no perímetro do sulco variam com o solo e com as suas condições, solos com maior estabilidade e menos sujeitos a erosão têm provavelmente uma relação entre a infiltração e a velocidade mais fraca (Trout,1992).

Trout, 1992, admite que os efeitos da velocidade de escoamento sobre a infiltração são multiplicativos e não aditivos, resultando na modificação das influências que outros factores, como o perímetro, exercem no aumento ou na redução da taxa de infiltração pelo efeito da velocidade.

3.2.2 Equações de infiltração

A taxa de infiltração é função do tempo e depende também das condições do sulco como a rugosidade, da formação de crosta à superfície, da secção tranversal do sulco e do perímetro molhado. As equações de infiltração devem descrever o mais correctamente possível a infiltração nas condições específicas que caracterizam cada rega (Serralheiro, 1995).

A variabilidade temporal e espacial constitui a maior limitação à capacidade de simular o comportamento da rega por sulcos com um elevado grau de confiança, de modo a conseguir obter níveis de eficiência semelhantes aos que se obtêm nos sistemas de rega de aspersão e gota-a-gota (Elliot e Walker, 1982).

Foram já desenvolvidos vários tipos de equações de infiltração, que se podem classificar em dois grupos, equações baseadas físicamente e equações empíricas. Apesar de existerem grande número de modelos que permitem calcular analiticamente a infiltração, a tendência dominante tem sido tentar obter empiricamente as equações. Esta disposição deve-se com certeza ao facto de ser comparativamente mais fácil obter dados para calcular empiricamente os parâmetros das equações do que considerar e quantificar todos os parâmetros necessários à modelação analítica do fenómeno. (Serralheiro, 1988). Clemens, 1983, citado por Scalopi *et al.,* 1995, afirma que as equações obtidas empiricamente se adaptam melhor aos valores de infiltração observados no campo que as equações obtidas teoricamente.

A determinação dos coeficientes das equações de infiltração deve ter em conta parâmetros hidráulicos como o caudal, a geometria do sulco e o perímetro molhado. O método dos infiltrómetros de sulco bloqueado e do balanço volumétrico permitem determinar os coeficientes das equações tendo em conta parâmetros hidráulicos como o caudal, a geometria do sulco e o perímetro molhado (Strelkoff e Souza, 1984).

Na rega por sulcos uma das equações empíricas mais frequentemente utilizadas para caracterizar a infiltração é a de Kostiakov

$$Z = k\ t^{a} \tag{3.6}$$

onde Z é a altura de água infiltrada em função do tempo t e k e a são parâmetros empíricos. Esta equação apresenta na sua forma derivada,

$$Z = a\ k\ t^{a-1} \tag{3.7}$$

uma taxa de infiltração que tende para zero à medida que o tempo tende para infinito. Na maior parte dos solos, o que acontece, depois de algum tempo de infiltração, é a estabilização da taxa de infiltração num valor constante. Assim alguns autores prefererem

utilizar uma equação que adiciona à equação (3.6) uma constante i_f que representa a infiltrabilidade final (estabilizada). Esta equação é conhecida por equação de Kostiakov "modificada" ou equação de Kostiakov-Lewis,

$$Z = k\ t^{a} + i_f\ t \tag{3.8}$$

A determinação do valor de i_f apresenta alguma dificuldade, já que se torna difícil determinar, para cada teste de infiltração, o momento em que taxa se encontra estabilizada.

A equação de Philip, de base analítica, apresenta uma forma semelhante à equação de Lewis,

$$Z = S\ t^{0.5} + C\ t \tag{3.9}$$

onde ***S*** é uma constante característica do solo que Philip denominou por "sorptivity" e representa a influência do potencial matricial e da condutividade hidráulica (Serralheiro, 1996). O parâmetro ***C*** representa a condutividade do solo saturado. Esta equação resulta dos dois primeiros termos do desenvolvimento em série que Philip fez da equação de Richards.

3.2.3 Determinação das equações de infiltração

O estudo da infiltração pode ser realizado por modelação teórica, utilizando métodos estatísticos ou a partir de dados das regas. Alguns autores têm utilizado métodos de regressão de pares de dados obtidos no campo (tempo de infiltração e volume infiltrado) para determinar as equações de infiltração. A regressão é normalmente feita recorrendo ao método dos mínimos quadrados ou utilizando o método da "optimização exacta". Este método tem como base o cálculo iterativo que procura obter o menor valor para os erros verificados entre os volumes observados e calculados, e o método dos dois pontos apresentado por Elliot e Walker, 1982.

O método dos dois pontos considera que a curva que representa a infiltração passa por dois pontos definidos por dois pares de valores experimentais (volume, tempo) ou seja

calcula os parâmetros da equação de infiltração a partir da substituição separada de dois pares de valores experimentais na equação.

As características especiais da infiltração em sulcos obrigam a que o estudo da infiltração se faça em infiltrómetros de sulco ou durante o processo de rega. Através de testes realizados em infiltrómetros de sulco bloqueado ou em infiltrómetros de sulco com retorno, é possivel determinar o volume de água que se infiltra por unidade de comprimento de sulco, em função do tempo. Os infiltrómetros de sulco bloqueado, ao contrário dos infiltrómetros de recirculação, não permitem a circulação da água no sulco criando condições de infiltração ligeiramente diferentes das verificadas durante a rega. Serralheiro, 1996, refere também a utilização como infiltrómetro de um troço relativamente longo do sulco (sulco infiltrómetro ou método de "inflow-outflow"), dependendo o rigor deste método da segurança utilizada na medição dos caudais e da representatividade das condições de infiltração verificadas ao longo do sulco.

Serralheiro, 1996, defende que o cálculo dos parâmetros das equações de infiltração a partir dos dados das regas será provavelmente o processo mais seguro.

Strelkoff e Souza, 1984, recomendam que no cálculo dos coeficientes das equações de infiltração sejam utilizados métodos que considerem os parâmetros hidráulicos, como o caudal, a geometria do sulco e o perímetro molhado.

Elliot e Walker, 1982, afirmam que a melhor metodologia para avaliar a infiltração consiste na recolha de dados sobre o avanço, a geometria da secção transversal e os volumes excedentes. A partir destes dados, com base nos cálculos do balanço volumétrico, pode ser calculada a taxa de infiltração. Este método permite determinar parâmetros da equação de infiltração representativos de todo o comprimento do sulco e de uma situação de rega real.

A maioria dos métodos de balanço volumétrico utilizados para calcular as equações de infiltração são deduzidos a partir de dados recolhidos durante a fase de avanço. Fangmeier e Ramsey, 1978, verificaram que as equações obtidas a partir dos dados de avanço subestimam a infiltração que acontece durante as fases posteriores da rega.

3.2.3.1 Método de Elliot e Walker

Elliot e Walker, 1982, desenvolveram um método que permite obter a equação de Kostiakov-Lewis a partir de dados de avanço, volume e tempo de infiltração.

Este método descreve a fase de avanço da rega através duma relação potencial entre a distância percorrida pela água, e o tempo gasto para percorrer esta distância,

$$x = p\, t_x^{\,r} \tag{3.10}$$

onde x é a distância de cada estação à cabeceira do sulco, t_x o tempo que a água demora a atingir a mesma estação e p e r são parâmetros empíricos. Estes parâmetros podem ser obtidos utilizando o método dos dois pontos ou por ajustamento iterativo.

A determinação dos parâmetros da equação de infiltração divide-se em duas fases. Na primeira é determinado o valor da infiltrabilidade final, i_f, através do cálculo do balanço entre o caudal de entrada e de saída:

$$i_f = \frac{Q_0 - Q_x}{x} \tag{3.11}$$

onde Q_0 representa o modulo parcelar e Q_x é o caudal medido a uma distância x do início da parcela. Estes valores são considerados numa fase adiantada da rega para que a infiltrabilidade se encontre estabilizada. Na segunda fase os parâmetros empíricos são calculados através do balanço volumétrico realizado para dois pontos durante a fase de avanço.

O balanço volumétrico traduz a lei da continuidade ou da conservação da massa (Serralheiro, 1996), considerando que o volume total aplicado é igual ao somatório do volume armazenado à superfície e do volume infiltrado,

$$Q_0 \cdot t = V_y(t) + V_z(t) \tag{3.12}$$

onde Q_0 é o módulo parcelar, $V_y(t)$ o volume armazenado à superfície e $V_z(t)$,o volume infiltrado durante o tempo de aplicação t . O volume armazenado superficialmente pode ser calculado pelo produto da área média da secção transversal do escoamento, $\overline{A}$, pelo comprimento, x, ocupado pela toalha de água no instante t

$$V_y(t) = \overline{A} \cdot x \tag{3.13}$$

Nos modelos de balanço volumétrico admite-se normalmente que a área, A, se mantém constante e se pode relacionar, através de um "coeficiente de forma", σ_y , com A_0, a área da secção transversal por onde escoa Q_0 : $A = \sigma_y A_0$

Os valores indicados para coeficiente, σ_y , de forma variam entre os 0.70 e os 0.80, quando não existe nenhum tipo de informação é recomendado o valor 0.77 (Serralheiro, 1996).

Para calcular o volume infiltrado Elliot e Walker, 1982, baseam-se num procedimento apresentado por Christiansen *et al.*, 1966, que apresenta a seguinte relação,

$$V_z(t) = \sigma_z \, k \, t^a \, x + \frac{i_f \, t \, x}{1+r} \tag{3.14}$$

onde r é o expoente da equação de avanço (3.10) e σ_Z é um "coeficiente de forma" que resulta da integração da equação de infiltração para cada ponto do sulco, x, durante o respectivo tempo de infiltração, t_x,

$$\sigma_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a)(1+r)} \tag{3.15}$$

E a equação do balanço volumétrico passa a apresentar a forma,

$$Q_0 \, t = \sigma_y A_0 \, x + \sigma_z \, k \, t_x^a + \frac{i_f \, t_x}{1+r} \tag{3.16}$$

O método de Elliot e Walker resolve a equação do balanço volumétrico utilizando o "método dos dois pontos". Os tempos de avanço t_1 e t_2 a que correspondem os comprimentos L_1 e

L_2, de duas estações de controlo, são substituidos separadamente na equação (3.16). Normalmente para a distância L_1 considera-se o ponto médio do sulco, enquanto L_2 se localiza no fim do sulco. Juntando no segundo membro os termos com incógnitas obtêm-se as equações:

$$\begin{aligned} \frac{Q_0 \cdot t_1}{L_1} - \sigma_y \cdot A_0 - \frac{i_f \cdot t_1}{1+r} &= \sigma_z \cdot k \cdot t_1^a \\ \frac{Q_0 \cdot t_2}{L_2} - \sigma_y \cdot A_0 - \frac{i_f \cdot t_2}{1+r} &= \sigma_z \cdot k \cdot t_2^a \end{aligned} \tag{3.17}$$

Os primeiros membros das equações pode ser calculados e são representados pelos valores M_1 e M_2. Dividindo as equações membro a membro obtem-se

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^a \tag{3.18}$$

Logaritmizando a equação (3.18) temos:

$$a = \frac{ln(M_1/M_2)}{ln(t_1/t_2)} \tag{3.19}$$

Substituindo ***a*** na equação (3.15) obtem-se σ_Z e utilizando uma das equações (3.17) é possível calcular ***k***,

$$k = \frac{M_1}{\sigma_z \cdot t_1^a} = \frac{M_2}{\sigma_z \cdot t_2^a} \tag{3.20}$$

Quando na equação de Kostiakov modificada se anula o valor da infiltrabilidade final, i_f, obtem-se a equação de Kostiakov o que permite determinar a equação de Kostiakov pelo método de Elliot e Walker.

3.3 *Avaliação da qualidade da rega*

A infiltração varia de sulco para sulco e ao longo de cada sulco, provocando variações na quantidade de água infiltrada, no escoamento final e na qualidade da rega. Ao regar uma parcela pretende-se normalmente fornecer à cultura uma determinada dotação e conseguir que ao longo da parcela a quantidade de água fornecida seja uniforme.

A avaliação de uma rega consiste no cálculo de parâmetros que traduzem em que medida se conseguiram atingir os objectivos pretendidos (Serralheiro, 1996).

A avaliação da rega permite entre outras coisas compreender melhor o pocesso de rega, de modo a conseguir identificar os possiveis problemas e introduzir alterações nas regas seguintes.

Os parâmetros de avaliação mais utilizados para avaliar as qualidades da rega são traduzidas por relações matemáticas entre os volumes aplicado V_a, útil V_u, infiltrado V_i, percolado V_p, e o excedente final V_f.

A eficiência de aplicação traduz a relação entre a quantidade de água aplicada e a fracção de água aplicada que fica retida na zona radicular que poderá ser utilizada pelas plantas. Este parâmetro constitui o indicador da economia de água e do desempenho geral da rega (Serralheiro, 1996).

$$e_a = \frac{V_u}{V_a} \tag{3.21}$$

Outro dos parâmetros utilizado para avaliar o desempenho da rega é a eficiência de infiltração,

$$e_i = \frac{D}{Z} = \frac{V_u}{V_z} \tag{3.22}$$

que relaciona as dotações média útil D, e a infiltrada Z, ou seja o volume de água que se encontra à disponibilidade da planta e o volume infiltrado. Este indicador destaca as eventuais perdas por percolação indicando a fracção da água infiltrada que fica retida na zona radicular.

Os indicadores de uniformidade permitem avaliar a rega em relação a cada ponto da parcela. O coeficiente de uniformidade de Christiansen é o indicador mais utilizado,

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1} \left| \overline{D_i} - \overline{D} \right|}{N\,\overline{D}} \qquad (3.23)$$

onde se relaciona a soma dos desvios absolutos para a média de n valores observados da dotação aplicada, com o volume total aplicado.

Outro indicador utilizado para quantificar a constância da distribuição da água ao longo da parcela é a uniformidade de distribuição,

$$UD = \frac{Zq_i}{\overline{Z}} \qquad (3.24)$$

onde Zq_i representa a média dos *n/4* menores valores observados da infiltração e $\overline{Z}$ é a infiltração média dos *n* pontos observados em toda a parcela (Serralheiro, 1996).

Na rega por sulcos a falta de uniformidade da infiltração é geralmente o resultado combinado de tempos de oportunidade de infiltração diferentes e de variações das caracerísticas da infiltração ao longo do campo. Além disso a taxa de infiltração diminui com o tempo. Assim, a altura de água aplicada na zona menos regada pode ser aumentada sem que cresça a mesma percentagem noutras áreas do sulco.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

4. Material e métodos

Neste capitulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho experimental em que se baseou este estudo. Os ensaios de rega destinaram-se a obter dados para o cálculo das curvas de avanço e de recessão, da eficiência e uniformidade das regas e para a caracterização da erosividade da rega.

Os trabalhos de campo apresentam normalmente algumas dificuldades que são consequência da impossibilidade de controlar todas as situações que influenciam, de alguma maneira, os resultados obtídos.

Os ensaios de rega referidos decorreram durante o Verão de 1995.

4.1 Localização e caracterização do campo de ensaios

4.1.1 Localização

O trabalho experimental decorreu na Herdade do Cabido situada a 5 km de Arraiolos, Distrito de Évora, na estrada que liga Arraiolos à aldeia da Igrejinha, que se encontra inserida no perímetro de rega do Divor. A Universidade de Évora dispõem há alguns anos de um protocolo de cooperação com a entidade gestora desta exploração, Cooperativa Agricola do Cabido e Anexas, que tem permitido a realização de vários trabalhos sobre os métodos de rega de superfície. A parcela onde se realizou o ensaio já foi objecto de anteriores estudos de métodos de rega de superfície, existindo por isso alguma informação disponível.

4.1.2 Topografia

A parcela de terreno onde decorreu o ensaio representa bem as características do relevo mais comuns nos regadios do Alentejo, onde dominam as zonas de terreno ondulado suave.

Na figura 3.1 apresenta-se a carta topográfica da parcela onde decorreram os ensaios Nesta parcela os maiores declives variam de 1% a 2,4 %.

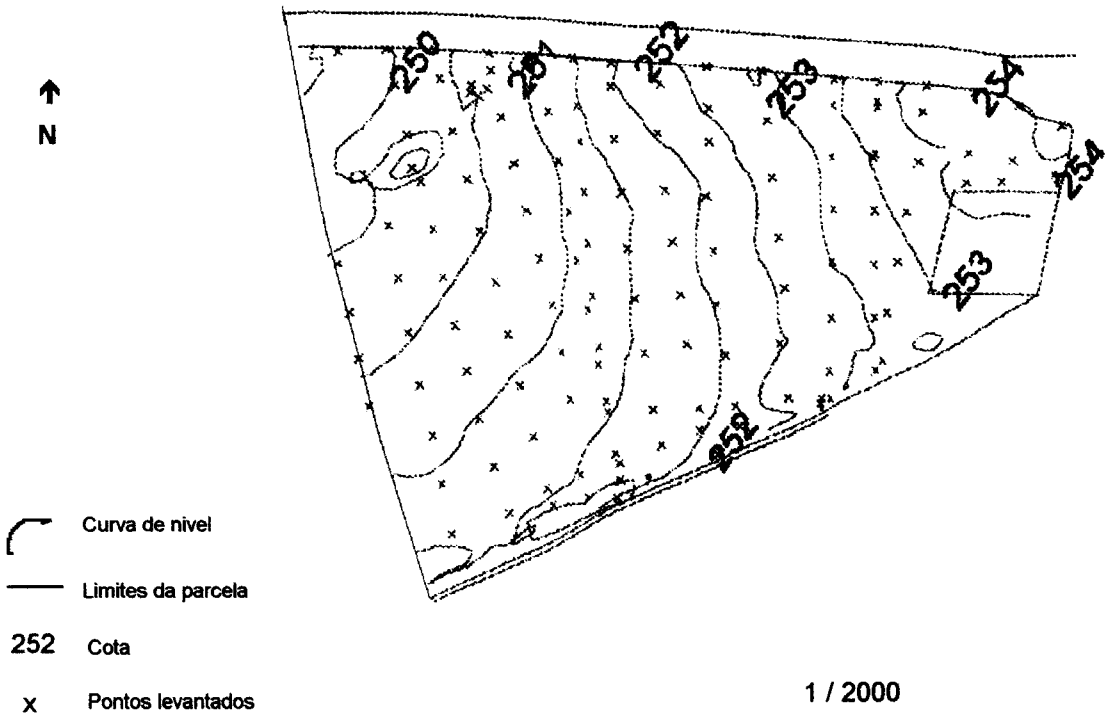


Figura 4.1 - Carta topográfica da parcela experimental.

4.1.3 Caracterização hidropedológica

Os solos da parcela onde se instalou o ensaio pertencem a uma familia do grupo dos solos Mediterrâneos Pardos de materiais não calcários, Subgrupo Normais de Quartzodioritos. Estes solos fazem parte da ordem dos solos Argiluviados pouco insaturados, sub-ordem dos Pardos. Na classificação Americana são designados como "Ustalfs", "Normustalfs" e "Vertustalfs", e como "Sols bruns et rouges léssivés" na classificação Francesa.

Os solos Mediterrâneos caracterizam-se pela existência de um horizonte A de grande permeabilidade que cobre um horizonte B textural, de fraca permeabilidade e com sinais claros de argiluviação. A camada superficial apresenta uma textura arenosa que se

transforma nítidamente numa textura mais pesada no horizonte B. Quer o horizonte A, quer o horizonte B, apresentam normalmente uma espessura que varia entre os 30 e os 40 cm.

Estes solos apresentam uma capacidade de troca catiónica muito variável, que acompanha a distribuição da argila. A capacidade de troca catiónica é baixa ou mediana nos horizontes superiores e mediana nos horizontes onde se acumula a argila (Cardoso,1965). Apresentam muitas vezes um grau de saturação muito elevado quase sempre superior a 75% (Cardoso,1965). Para a capacidade de campo apresenta valores moderados ou elevados. Quanto à capacidade utilizável são caracterizados pela existência de valores baixos nos horizontes superficiais e moderados nos horizontes inferiores. O pH varia de ligeiramente baixo a neutro podendo ser ligeiramente alto nos solos em que há carbonatos. A expansibilidade é baixa, predominando no horizonte de acumulação a ilite, com certa percentagem de montmorilonite.

Nos quadros são apresentados os valores analíticos que caracterizam o solo do campo experimental obtidos a partir de um estudo realizado por Ramos, 1995.

Prof. (cm)	0-10	10-20
Ca^{2+} (meq/ 100g)	2,47	2,32
Mg^{2+} (meq/ 100g)	2,13	2,10
Na^{+} (meq/ 100g)	0,23	0,21
K^{+} (meq/ 100g)	0,16	0,15
S (meq/ 100g)	4,99	4,75
T (meq/ 100g)	8,02	7,56
V (%)	62,53	63,36

Ramos, 1995

Quadro 4.1 -Caracterização do complexo de troca.

A partir da análise dos valores referentes ao complexo de troca pode verificar-se que o cálcio é o catião dominante, mas apresentando valores apenas ligeiramente superiores ao magnésio. O grau de saturação em bases é mais reduzido que o apresentado por Cardoso,

1965. Ramos, 1995, atribui estes valores à existência de minerais do tipo 2:1 com expansibiidade relativamente baixa, onde a ilite predomina em relação à montmorilonite. A quantidade de sódio de troca parece não revelar problemas de sodização. O pH do solo varia entre 5,6-6,5.

Prof. (cm)	*0-10*	*10-20*	*20-40*	*40-50*	*50-60*
Areia grossa (%)	42,2	42,0	40,9	35,9	39,6
Areia fina (%)	36,5	36,3	34,8	30,0	25,4
Limo (%)	9,4	10,0	10,0	11,7	11,6
Argila (%)	11,9	11,7	14,3	22,4	23,4
Classe Textural (%)	Franco arenosa	Franco arenosa	Franco argilo arenosa	Franco argilo arenosa	Franco argilo arenosa

Ramos, 1995

Quadro 4.2 - Análise granulométrica e classifição textural.

O Quadro 4.2 mostra nítidamente o aumento da percentagem de argila com a profundidade

Densidade aparente apresenta valores mais elevados que os indicados por Costa, 1985, para texturas franco-arenosas e franco-argilo-arenosas que caracterizam os horizontes do solo da parcela experimental (Ramos, 1995).

A capacidade de campo e o coeficiente de emurchecimento registam valores mais baixos nas camadas superficiais, onde a textura é mais ligeira. Nas texturas franco-argilo--arenosas, das camadas mais profundas, o valor da capacidade de campo é mais elevado, mas este crescimento é também acompanhado pelo coeficiente de emurchecimento (Quadro 4.3). A capacidade utilizável apresenta um comportamento semelhante ao descrito por Cardoso, 1965, sendo mais elevada nas camadas de textura mais pesada onde as raizes têm grande dificuldade em penetrar.

Prof. (cm)	*0-10*	*0-20*	*20-40*	*40-50*	*50-60*
Dap (g/cm3)	1,58	1,6	1,66	1,55	1,63
CC (% do volume)	19,9	20,1	26,8	29,5	29,5
CE (% do volume)	9,7	10,9	11,41	14,2	16,6
CU (% do volume)	10,2	9,2	10,5	12,8	12,8

Ramos, 1995

Quadro 4.3 - Retenção da água no solo e densidade aparente.

4.1.4 Caracterização da infiltração em solos argiluviados

A infiltração depende das condições da superfície do solo, como a rugosidade, o perímetro molhado e a protecção da superfície do solo por resíduos de culturas. No entanto a condutividade hidráulica de qualquer camada de solo pode controlar o movimento da água que entra no solo (Serralheiro e Oliveira, 1994).

A fraca espessura efectiva e a existência de impermes estruturais no perfil caracterizam os solos mediterrâneos. Juntando a estas características uma estrutura frágil, obtemos as condições necessárias à degradação da agregação e ao transporte das partículas de solo, criando diferenças de fertilidade, de textura e de infiltração ao longo da parcela de rega.

Os solos mediterrâneos caracterizam-se pela existência de um horizonte A muito permeável com cerca de 30 cm de espessura e de um horizonte B pouco permeável que determina o processo de infiltração. No início da rega, enquanto a água se infiltra no horizonte A, a infiltração apresenta grande intensidade. Este comportamento mantêm-se até que o horizonte A se encontre saturado e a sua duração depende da espessura do horizonte A, das suas características intrinsecas, e do teor de humidade antes da rega.

Quando a frente de humedecimento atinge o horizonte B, a infiltração começa a fazer-se quase exclusivamete na horizontal, diminuindo gradualmente à medida que a frente de humedecimento, controlada pelo gradiente hidráulico, vai evoluindo no perfil. A infiltração

reduz-se até quase se anular quando começa a existir intercepção entre os perfis de humedecimento dos sulcos vizinhos. O espaçamento entre sulcos e as características do horizonte A determinam a duração desta fase.

As características do processo de infiltração vão reflectir-se na fase de avanço.

O desenvolvimento das raizes no horizonte B é muito limitado, o que reduz a quantidade de água e de nutrientes que se encontram à disposição das plantas (Serralheiro e Oliveira, 1994).

Nestes solos a baixa permeabilidade do horizonte B limita a taxa de infiltração final (estabilizada).a valores muito baixos.Quando a frente de humedecimento atinge o horizonte B o movimento da água começa a ser principalmente horizontal e é determinado pelo gradiente matricial que decresce à medida que a frente de humedecimento se afasta do sulco (Serralheiro, 1995). Na equação de Kostiakov a taxa de infiltração diminui à medida que o tempo aumenta traduzindo mais correctamente o processo de rega nos solos argiluviados. Serralheiro, 1988, utilizou as equações de Philip, Kostiakov-Lewis e Kostiakov para caracterizar a infiltração em 20 testes de rega realizados em solos Mediterrâneos, verificando que a equação de Kostiakov é a única que representa sem restrições a infiltração neste tipo de solos, conseguindo valores simulados mais próximos dos valores reais.

4.1.5 Caracterização da fase de avanço nos solos argiluviados

Os solos argiluviados apresentam uma curva de avanço típica que reflete as características do perfil. No início da rega enquanto a água se infiltra no horizonte A o solo comporta-se como muito permeável, a infiltração é muito intensa e o avanço é lento. Quando a frente de humedecimento atinge o horizonte B, quase todo o caudal que atinge uma determinada secção avança para a secção seguinte. À medida que a frente de humedecimento se vai afastando do sulco a infiltração diminui, tornando-se quase nula quando se atinge a frente de humedecimento do sulco vizinho. A duração de cada uma destas fases depende da espessura dos horizontes, das suas características intrínsecas e do teor de humidade verificado antes da rega. A duração da última fase depende também do espaçamento entre sulcos. Este processo vai-se repetindo ao longo do sulco quase

uniformemente, desenhando uma curva que contrasta com as curvas dos solos de perfil homogéneo, em que a infiltração continua reduzindo gradualmente a velocidade de avanço (Serralheiro, 1988).

Serralheiro, 1988, designa o comportamento característico da fase de avanço nestes solos por "efeito argiluviado", referindo que a linearidade típica da curva de avanço dos solos argiluviados traduz a pequena variação da velocidade de avanço ao longo do sulco. Na equação do avanço valores do expoente próximos da unidade reflectem a linearidade da curva.

Este comportamento típico da fase de avanço dos solos argiluviados pode ser alterado por vários factores como a utilização de caudais elevados, a rugosidade, o declive e o espaçamento dos sulcos. Serralheiro, 1988, refere que o maior espaçamento dos sulcos ou o aumento da rugosidade podem acentuar este comportamento e o uso de caudais elevados torná-lo menos evidente.

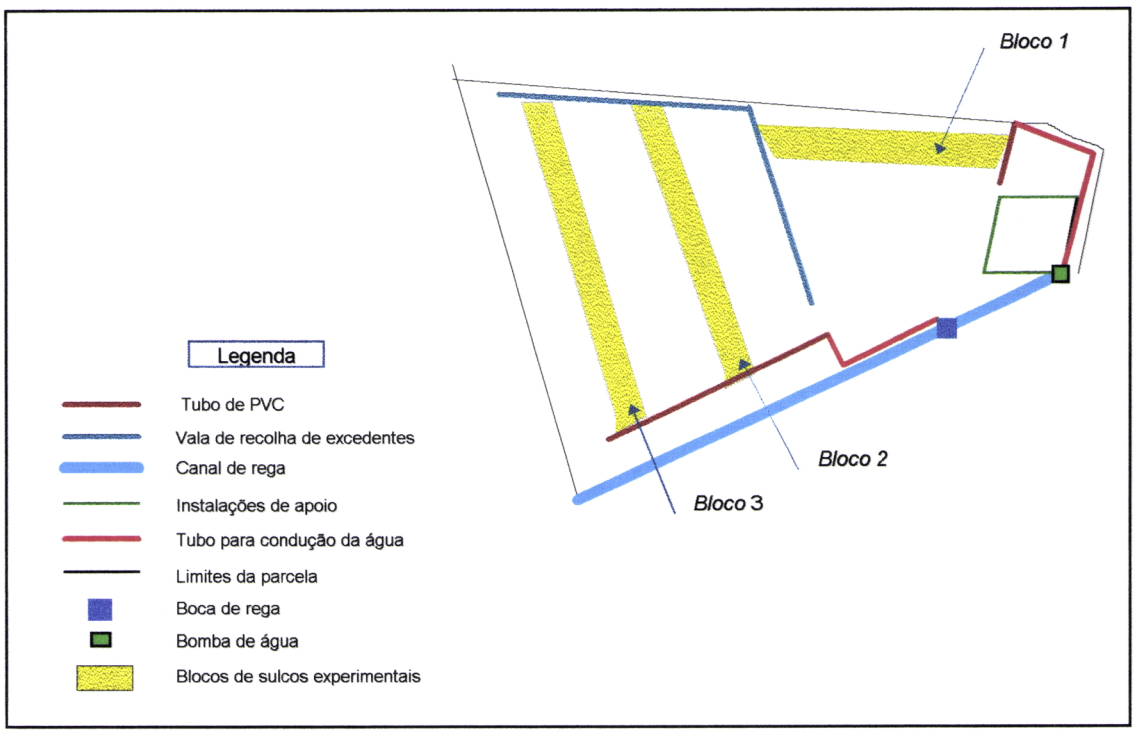


Figura 4.2 - Esquema da parcela onde foi realizado o ensaio.

4.2 Delineamento experimental

Este estudo baseou-se em ensaios realizados num campo experimental em que todo o trabalho de organização da parcela, preparação do solo, sementeira e abertura dos sulcos de rega foi realizado pelo agricultor. As operações de preparação do solo foram efectuadas segundo o que é normalmente realizado na região. Na parcela foi semeado girassol, em linhas espaçadas 0,75 m.

Com a realização do ensaio pretendeu-se caracterizar a infiltração e avaliar as qualidades da rega por sulcos realizada nestas condições e o seu efeito sobre a perda de solo.

Figura 4.3 - Aspecto geral da parcela.

Depois de implantado o sistema no terreno realizou-se o levantamento topográfico das entrelinhas, determinando os declives longitudinais para definir zonas da parcela que constituissem blocos de declives distintos.

As modalidades consideradas no ensaio foram assim definidas com base no declive. A sua localização foi determinada de modo a representar 3 situações diferentes presentes na parcela; as situações extremas, com declives que se aproximavam de 1% e 2%

respectivamente, e uma situação média com declives que se aproximavam de 1,5%.

Para cada modalidade foi escolhido um grupo de 4 sulcos representativos, sobre os quais se realizaram as avaliações de campo (Figura 4.2). Para cada bloco foi calculado um módulo parcelar adaptado às condições de declive.

O comprimento útil dos sulcos, indicado no Quadro 4.4, foi determinado pela sua localização na parcela e difere de bloco para bloco, apresentando valores que variam entre os 115 e os 149 m.

	Sulco nº	Declive %	Comprim.do sulco (m)
Bloco 1	1	2,3	119,4
	2	2,4	119,5
	3	2,3	117,1
	4	2,3	115,1
Bloco 2	1	1,2	124,1
	2	1,2	124,8
	3	1,2	126,2
	4	1,2	127,3
Bloco 3	1	1,5	140,1
	2	1,5	140,9
	3	1,5	143,6
	4	1,5	143,8

Quadro 4.4 - Declive e comprimento de cada sulco.

Foram assim acompanhados 12 sulcos divididos em 3 blocos que representam classes diferentes para os declives, os caudais de alimentação e os comprimentos dos sulcos. Os blocos foram designados a partir da sua localização na parcela por: Bloco 1, Bloco 2 e Bloco 3.

O declive médio de cada sulco foi avaliado através do levantamento das cotas relativas efectuado de 5 em 5 m, de modo a definir pormenorizadamente o perfil longitudinal do sulco. Os valores do declive, apresentados no Quadro 4.4, foram calculados entre o primeiro e o último pontos cotados de cada sulco.

Para a alimentação dos sulcos foram instalados tubos de PVC de 200 mm de diâmetro com janelas, onde se instalaram torneiras que distribuiam a água individualmente aos sulcos

(Figura 4.4). Os tubos eram alimentados a partir do canal de rega por gravidade, utilizando uma manga plástica para a condução da água, e por bombagem conduzindo a água em tubos metálicos de acoplamento rápido.

Figura 4.4 - Torneiras instaladas nas janelas do tubo de alimentação.

Nas extremidades de montante e de jusante dos sulcos foram instalados canaletes medidores e sensores de ultra-sons para o registo dos caudais de entrada e saída.

Durante a rega também se fez o registo dos tempos de avanço e recessão. O estudo da erosividade da rega foi baseado na evolução das secções tranversais dos sulcos estudados e na recolha dos sedimentos realizada no fim do sulco.

Durante o ensaio realizaram-se 3 regas em cada bloco, que são designadas ao longo do trabalho por 1ª, 2ª e 3ª regas. Uma forte chuvada que ocorreu antes da 1ª rega modificou as condições da superfície do solo, não permitindo que os dados obtidos com a 1ª rega traduzam o efeito duma rega realizada após a mobilização do solo. Para compensar esta situação, foi realizada no Bloco 3 uma rega adicional que pretendeu simular as condições da rega realizada após a abertura dos sulcos.

Uma falha no sistema de registo dos volumes de escoamento no fim do sulco não permitiu a avaliação dos resultados da 2ª rega realizada no Bloco 3.

4.2.1 Caudais de alimentação

Um dos objectivos do trabalho foi a adaptação dos caudais de alimentação dos sulcos às condições de declive, de modo a obter caudais não erosivos. A sua determinação baseou-se na equação (2.1) de W. D. Criddle (Hamad e Stringham, 1978 e Koluvek *et al.*,1993):

$$Q_m = 0.63/S$$

em que Q_m é o caudal máximo não erosivo expresso em $l \cdot s^{-1}$ para o declive *S*.

Para as três situações de declive existentes na parcela de rega foram definidos valores indicativos que são indicados no Quadro 4.5.

Declive %	**Caudal** $l \cdot s^{-1}$
1%	0.5
1,5%	0.4
2%	0.3

Quadro 4.5 - Valores calculados para o caudal utilizando a fórmula de Criddle.

4.2.1.1 Medição do caudal

Para a medição do caudal de alimentação dos sulcos foram instalados canaletes medidores equipados com sondas de ultra-sons. Utilizaram-se canaletes triangulares de soleira espessa, desenvolvidos por Replogle e Bos, 1982, e descritos por Serralheiro, 1996. No canalete uma abertura ao nível do plano da soleira comunica, através de um tubo flexível, a altura da água a um poço de estabilização onde se insere uma sonda de ultra-sons.

As sondas de ultra-sons medem a altura de água a intervalos regulares e fazem o seu registo num datalogger. O início do registo e a sua frequência são previamente programados

utilizando, para isso, software adequado. O acesso aos dados registados faz-se através do programa TCSAB que permite a sua apresentação sob a forma de tabela ou hidrograma. Os canaletes dispõem também duma escala volumétrica que permite a leitura directa do caudal, facilitando o controle permanente do módulo parcelar. O registo dos caudais de alimentação foi efectuado em todos os sulcos ao longo da rega através de leituras realizadas com intervalos de 1 minuto.

Este sistema foi previamente calibrado no canal de testes do Laboratório de Hidrologia da Universidade de Évora, calculando-se para cada canalete uma equação de regressão que relaciona a altura de água medida pela sonda com o volume de água medido pelo canalete.

4.2.2 Caracterização da fase de avanço

Durante a montagem do ensaio foram colocadas estacas para referenciar as 10 estações de medição do avanço da água definidas em cada sulco. A distância entre cada estação difere de sulco para sulco, dependendo do seu comprimento e foi igual a 1/10 do comprimento do sulco. A chegada da frente de humedecimento à estação foi registada através de controladores instalados, no leito do sulco, em cada estação. Estes controladores são constituidos por um relógio analógico e um flutuador que, com a chegada da água, desliga o relógio ficando registada a hora em que a frente da lâmina de água atinge a estação (Figura 4.5). Conhecida a hora a que se iniciou a rega é possivel determinar o tempo que a água levou a atingir a estação.

Algumas das medições foram realizadas por observação directa da chegada da água a cada estação.

4.2.3 Caracterização da fase de recessão

A caracterização desta fase da rega constitui muitas vezes uma dificuldade. A irregularidade da superfície do solo permite que a água desapareça em certas zonas quando a montante ainda existe água à superfície. Em muitas situações o recuo da água na

superfície do sulco acontece simultaneamente na extremidade de montante e de jusante. Estes factores favorecem o aparecimento de situações difíceis de diagnosticar que aumentam o peso da subjectividade do observador na sua definição.

A avaliação dos tempos de recessão foi efectuada por observação directa do recuo da água na superfície do sulco após o corte do caudal de alimentação.

4.2.4 Profundidade de escoamento

Na medição da profundidade do escoamento foi utilizada uma régua graduada. As medições foram efectuadas durante a fase de manutenção, em 3 das secções de referência, estabelecidas para a caracterização da geometria transversal do sulco, localizadas no início, no meio e no fim do sulco.

Figura 4.5 - Aparelho utilizado para registar os tempos de avanço.

4.2.5 Geometria da secção transversal

A utilização de modelos matemáticos do escoamento e dos métodos de determinação das equações de infiltração a partir dos tempos de avanço obriga ao conhecimento das relações geométricas que caracterizam a secção transversal do sulco.

A determinação da geometria da secção transversal foi realizada com dois objectivos diferentes: o primeiro consistiu na caracterização da secção transversal através da determinação das equações da área e do perímetro molhado e o segundo na comparação dos métodos utilizados para avaliar a forma do perfil.

A avaliação dos perfis transversais foi realizada em todos os sulcos antes de cada rega, introduzindo as alterações da secção tranversal resultantes de cada rega. As secções de controlo foram definidas por estacas colocadas nas paredes do sulco a uma distância fixa e definindo no topo uma linha horizontal transversal ao sulco (Figura 4.6). Em todos os sulcos as secções de controlo foram constituídas na cabeceira, a meio e no fim do sulco.

As secções foram reproduzidas com um perfilómetro de barras e com um perfilómetro de régua moldável. Devido às alterações introduzidas, o perfilómetro de barras revelou-se de mais fácil utilização que o perfilómetro de régua moldável descrito adiante. Estas alterações permitem realizar simultaneamente a leitura e o registo dos pontos que definem o perfil, tornando mais rápido todo o processo.

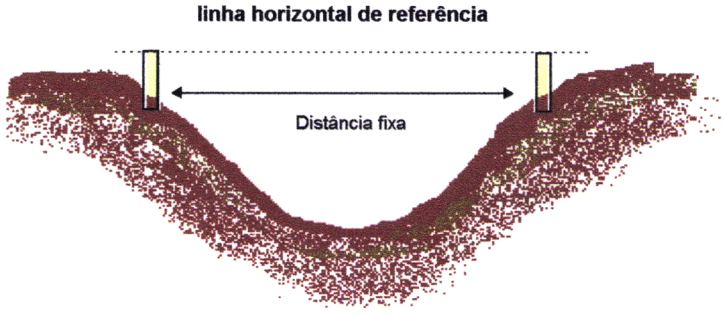


Figura 4.6 - Definição das secções de referência.

4.2.5.1 Perfilómetros

Qualquer dispositivo utilizado para reproduzir a geometria da secção transversal dos sulcos é designado por perfilómetro (Serralheiro, 1988).

O perfilómetro de régua moldável é constituido por uma régua flexível de desenhar curvas. Para reproduzir a secção do sulco a régua é moldada na superfície do sulco entre as estacas e marcam-se os pontos que intersectam a linha horizontal de referência. Depois, pousa-se numa prancheta e desenha-se o contorna da régua indicando os pontos de intersecção que definem a linha horizontal de referência (Figura 4.7).

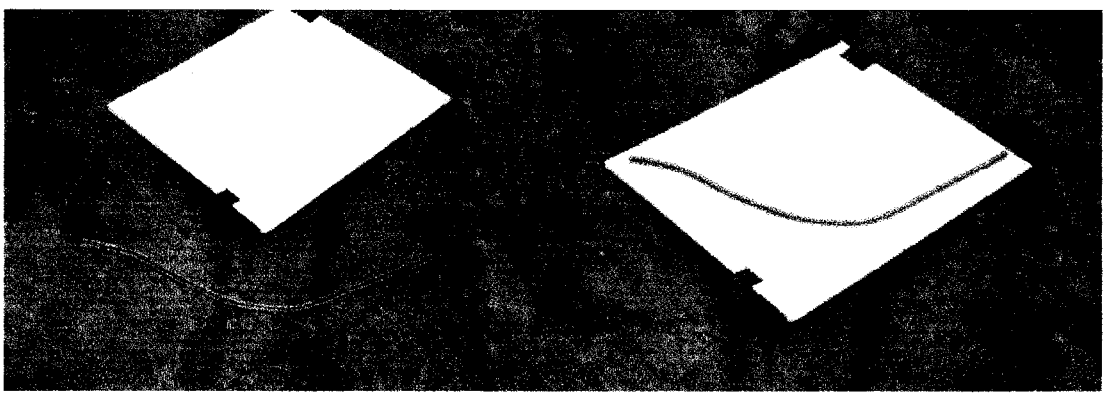


Figura 4.7 - Utilização de um perfilómetro de régua moldável.

O perfilómetro de prancheta utilizado na avaliação do perfil transversal dos sulcos é constituido por um suporte perfurado a intervalos de 1,5 cm, onde se inserem, verticalmente, varetas cilindricas móveis. O suporte é constituido por um perfil de alumínio de secção rectangular. A barra de alumínio está fixada à base inferior de uma prancheta de madeira onde se colocam folhas de papel. Junto á barra as varetas deslizam entre duas pequenas barras metálicas separadas por molas que permitem a imobilização das varetas quando necessário (Figura 4.8). O perfilómetro dispõe de dois níveis de bolha de ar que ajudam o operador a encontrar a posição correcta para realizar a leitura. Este perfilómetro foi

construido na oficina do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora e baseia-se no perfilómetro de Walker e Skogerboe, 1987.

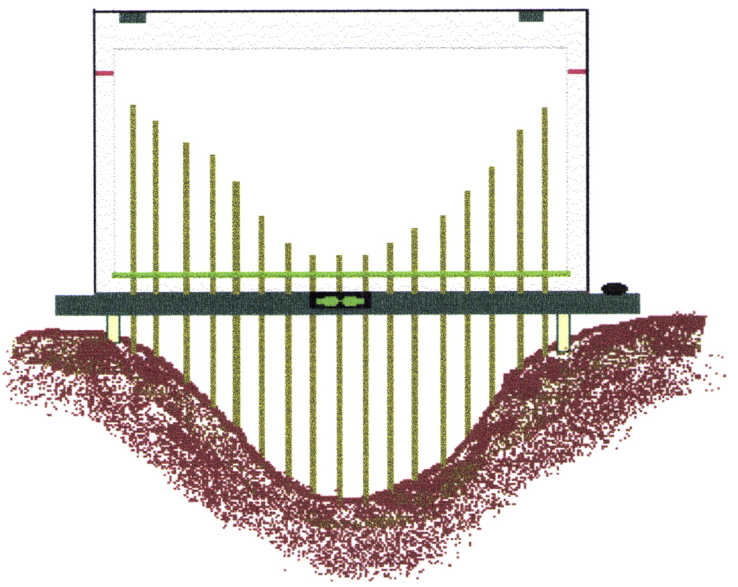


Figura 4.8 - Perfilómetro de barras.

Para realizar a avaliação do perfil transversal do sulco o perfilómetro é apoiado nas estacas e nivelado vertical e horizontalmente, libertam-se as varetas até ficarem apoiadas na superfície do sulco, voltam a fixar-se e registam-se na folha de papel. (Figura 4.9). O registo é feito assinalando na folha de papel a extremidade superior de cada vareta com uma caneta de ponta de feltro (Figura 4.10). Os pontos assim obtidos indicam a posição relativa de cada ponto do perfil reproduzindo a secção transversal do sulco.

Duas marcações desenhadas na prancheta definem uma linha recta paralela à base do perfilómetro que durante a leitura do perfil constitui a linha horizontal de referência. Estes marcações permitem assinalar na folha de papel, durante a leitura, os pontos extremos de um segmento de recta paralelo à linha horizontal de referência. Esta linha determina a posição da folha de papel em relação à linha horizontal de referência.

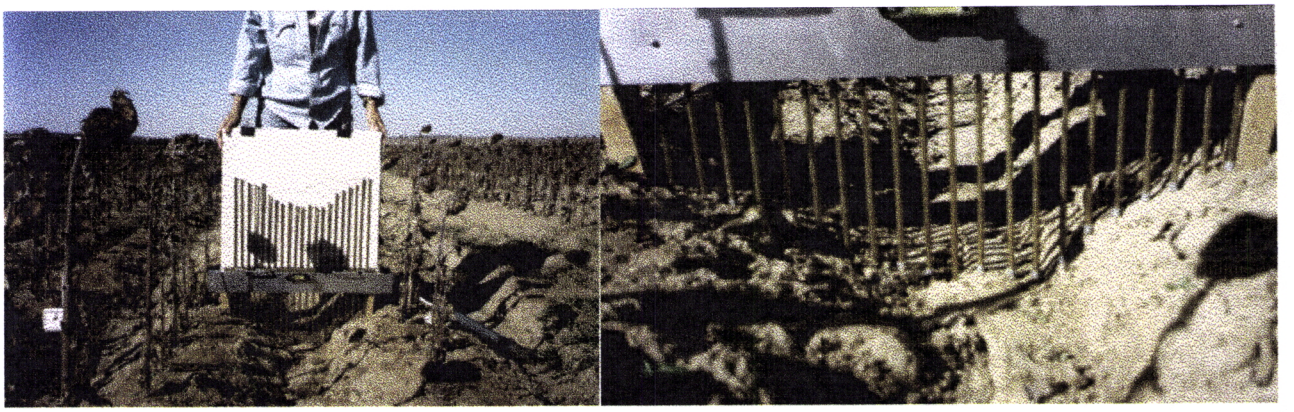


Figura 4.9 - Colocação do perfilómetro para efectuar a leitura e pormenor da definição do contorno do sulco pelas varetas.

Figura 4.10 - Marcação dos pontos que definem o perfil na folha de papel.

4.2.5.2 Determinação da área e do perímetro

A área e o perímetro molhado foram obtidos a partir dos perfis obtidos com o perfilómetro de rédua moldável. Em cada sulco foram avaliados antes de cada rega 3 perfis transversais localizados no início, a meio e no fim do sulco.

No gabinete desenha-se uma linha horizontal de referência unindo os dois pontos de intercepção assinalados no perfil. A seguir definem-se no perfil os pares de pontos correspondentes às diversas profundidades de escoamento determinados pelas rectas traçadas paralelamente à linha horizontal de referência. Os pontos assinalados no perfil são digitalizados transformando cada perfil num conjunto de coordenadas.

A área e o perímetro molhados foram calculados com o auxilio do programa "DIGITEQ" desenvolvido no Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora.O programa "DIGITEQ" calcula, a partir das cordenadas dos perfis tranversais dos sulcos, as equações da área e do perímetro molhado em função da profundidade do escoamento. Este programa elabora, a partir dos pontos digitalizados, uma matriz de valores em que a cada profundidade corresponde um valor para a área e outro para o perímetro, calculando depois por regressão, pelo método dos mínimos quadrados, as equações potência do tipo:

$$P_m = P_0 \cdot y^{R_0} \tag{4.1}$$

$$A_m = \sigma_1 \cdot y^{\sigma 2} \tag{4.2}$$

em que P_m e A_m são respectivamente o perímetro e a área molhados da secção tranversal do sulco, y é a altura de água sobre o talvegue do sulco P_0 , R_0 ,σ_1 e σ_2 constantes empíricas.

Os valores obtidos durante o ensaio são apresentados em Anexo.

4.2.6 Caracterização da rugosidade

A rugosidade influencia a relação de resistência que se estabelece entre o caudal e a profundidade de escoamento e consequentemente a infiltração. É normalmente traduzida pelo coeficiente de rugosidade de Manning (n), que se pode obter a partir da equação do escoamento uniforme de Manning-Strickler.

A rugosidade é um parâmetro difícil de determinar, sendo muitas vezes utilizados valores indicativos. Este parâmetro não foi calculado para as condições específicas do ensaio, tendo-se considerado um valor médio obtido para sulcos com as mesmas características em trabalhos anteriores. Foi utilizado o valor de n=0,04 que é normalmente utilizado em sulcos com solo nu.

A chuva forte que se verificou após a abertura dos sulcos e antes da 1ª rega modificou as condições da superfície do solo e provocou a formação duma crosta, introduzindo na superfície dos sulcos alterações que normalmente se verificariam com a 1ª rega. Além disso, a invasão da superfície dos sulcos por parte das infestantes não foi significativa, o que provalvelmente se ficou a dever ao início tardio da rega. Assim, estas situações permitiram utilizar o mesmo coeficiente de rugosidade para todas as regas, por certo sem erros significativos.

4.2.7 Avaliação do caudal excedente e da perda de sedimentos no fim do sulco

A perda de solo no sulco foi avaliada através da colheita de amostras de água recolhidas no fim do sulco. Com este tipo de amostragem pretende-se apenas recolher informação que permita avaliar a quantidade de solo que abandona a parcela de rega.

Na vala de recepção dos excedentes de rega foram instaladas caixas de recolha e medição do caudal excedente do sulco (Figura 4.11). Cada caixa é constituida por um compartimento de recolha e um compartimento de medição onde uma sonda de ultra-sons faz a medição e registo do caudal. Tal como nos canaletes, a sonda é colocada dentro de

um tubo que funciona como poço de estabilização. O registo dos caudais foi efectuado em todos os sulcos através de leituras realizadas com intervalos de 1 minuto.

A caixa debita para a vala através dum recorte em v aberto numa das faces e que constitui um descarregador de medida de soleira delgada. Para evitar que a turbulência do escoamento afecte a medição do caudal, os compartimentos são separados por uma chicana.

As caixas foram previamente calibradas, obtendo-se para o descarregador de cada caixa uma equação de vazão, que relaciona a altura de água medida pela sonda com o caudal do escoamento.

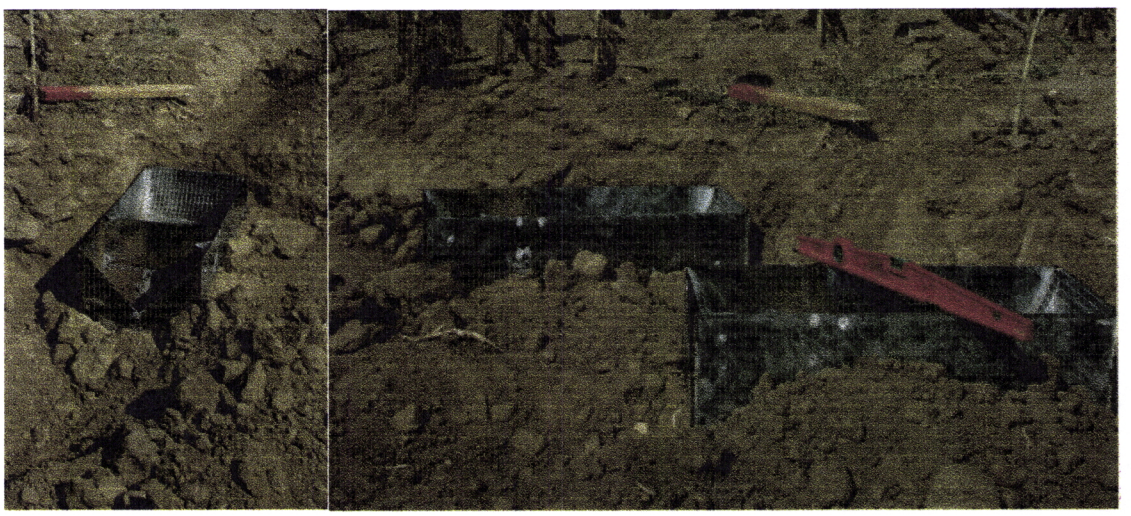


Figura 4.11 - Instalação das caixas de medição do caudal excedente.

Para evitar o aumento da intensidade da erosão, na parte final do sulco, provocada essencialmente pelo aumento da velocidade do escoamento, resultante do desnivel entre a superfície do sulco e a caixa de recolha, o troço final do sulco foi protegido. A superfície dos sulcos foi revestida com cimento branco de modo a evitar perturbações do escoamento que podessem provocar alterações na carga de sedimentos transportada pela corrente. Na parte final foi colocada uma calha para facilitar o escoamento e conduzir a água até à caixa de recolha, sem permitir a deposição da carga de sedimentos transportada (Figura 4.12). Foram utilizadas calhas de chapa zincada moldada à superfície do sulco e calhas plásticas, mais fáceis de instalar.

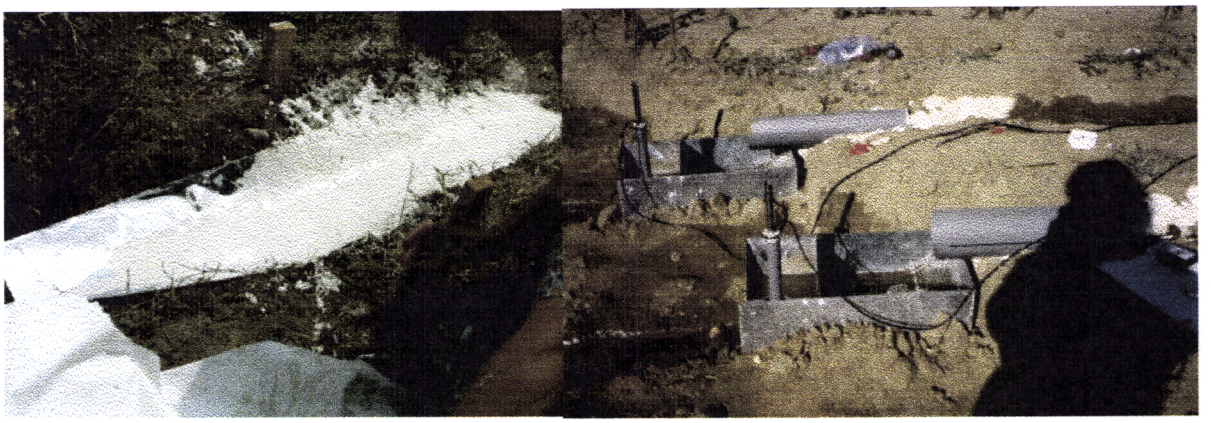


Figura 4.12 - Consolidação da zona final do sulco e caixas equipadas com sonda de ultra-sons.

As amostras de água foram recolhidas à saída das calhas em recipientes plásticos de 0,5 l de capacidade. Em cada sulco foram recolhidas várias amostras com intervalos de 30 minutos até terminar a rega (Figura 4.13).

Através da análise dos sólidos em suspensão, realizada no laboratório de águas do Departamento de Química da Universidade de Évora, foi determinado o peso de sedimentos por litro de água do escoamento final. A partir destes valores e do caudal, determinou-se a perda de sedimentos durante a rega por unidade de superfície.

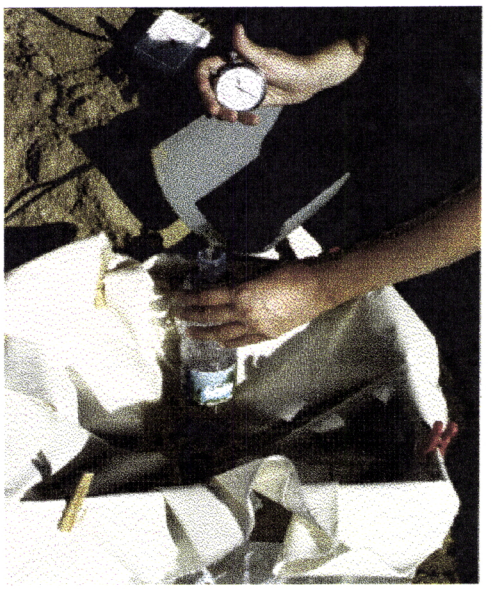


Figura 4.13 - Recolha de amostras de água.

4.3 Avaliação das regas realizadas

A análise das regas realizadas durante os ensaios de campo foi efectuada utilizando o programa ANREGA desenvolvido por Serralheiro, 1988. O programa permite caracterizar a infiltração através das equações de Kostiakov-Lewis, de Kostiakov e de Philip. Para caracterizar a infiltração nos ensaios de regas realizadas foi utilizada a equação de Kostiakov que , segundo Serralheiro, 1988 e 1995, é a que melhor descreve a infiltração nos solos argiluviados.

Este programa utiliza o método de Elliot e Walker, 1982, para determinar as equações de infiltração. O programa faz também o balanço volumétrico da rega, calculando os volumes infiltrado e excedente. As equações de infiltração calculadas são depois testadas e corrigidas através da comparação entre os volumes calculados e os volumes medidos no ensaio.

Os ficheiros de entrada são constituidos por dados que caracterizam o sulco como os parâmetros das equações da geometria do sulco, o número de estações em que se fez o controle dos tempos de avanço e de recessão, a equidistância entre estações, a rugosidade de Manning, o espaçamento entre sulcos, o declive; e pela informação recolhida durante a rega: caudais de alimentação e a profundidade do escoamento , o volume medido no fim do sulco e os tempos de avanço e de recessão. Para caracterizar a geometria transversal do sulco o programa necessita dos parâmetros das equações da área e do perímetro molhado de duas secções de controlo. Usam-se normalmente secções localizadas na cabeceira e no meio do sulco.

O programa descreve a fase da avanço utilizando a equação 3.10, calculada a partir dos tempos de avanço utilizando o método dos dois pontos com optimização iterativa.

As equações de infiltração são calculadas a partir dos tempos de avanço utilizando o método do balanço volumétrico de Elliot e Walker (Serralheiro, 1988). A partir do tempo de infiltração e utilizando a equação de infiltração pode ser calculada a dotação infiltrada em qualquer ponto da parcela. O tempo de infiltração (τ_x) para um ponto à distância X do início do sulco é a diferença entre o tempo de recessão e o tempo de avanço respectivos,

$$\tau_x = t_{rx} - t_x \tag{4.3}$$

Pode assim calcular-se a dotação média da parcela *D*, a partir *de* N valores de dotação cada um correspondendo a um valor de *X*,

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{N} D_i}{N} \tag{4.4}$$

e o volume total infiltrado

$$V_{ic} = D \cdot L = \frac{\sum_{i=1}^{N} D_i}{N} \cdot L \tag{4.5}$$

O volume total fornecido à parcela é calculado a partir do tempo de alimentação e do módulo parcelar (constante),

$$V_a = Q_0 \cdot t_a \tag{4.6}$$

O volume infiltrado medido V_{io}, resulta da diferença entre o volume medido no início do sulco e o volume medido no fim do sulco:

$$V_{io} = V_a - V_f \tag{4.7}$$

A diferença entre o volume infiltrado calculado (V_{ic}) e o volume infiltrado medido (V_{io}) constitui o resultado do teste efectuado à fiabilidade da equação de infiltração calculada. Com base nesta diferença é feito o ajustamento dos coeficientes da equação de infiltração.

O programa faz também ao cálculo dos parâmetros de avaliação da rega: eficiências da aplicação, da infiltração e do armazenamento, coeficientes de uniformidade e uniformidade de distribuição.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5. Apresentação e análise dos resultados

Este capítulo é composto por quatro partes. Na primeira são avaliadas as alterações do perfil longitudinal dos sulcos. Na segunda parte são apresentadas e analisadas as equações que caracterizam o avanço e a infitração nas regas realizadas, calculadas com a ajuda do programa Anrega (Serralheiro, 1988).

Na terceira são comparados os resultados obtidos com a avaliação da perda de sedimentos no fim do sulco.

Em seguida são apresentados os resultados das simulações das regas realizadas com o programa SIRMOD, um modelo de simulação desenvolvido pela Utah State University.

5.1.1 Evolução dos perfis longitudinais

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 são apresentadas as representações em gráfico dos perfis longitudinais dos sulcos antes e depois da realização das regas. A representação grafica permite uma comparação mais cómoda entre os perfis longitudinais antes e depois da realização das regas. Esta comparação limita-se, no entanto, à forma geral do perfil, não permitindo uma avaliação quantitativa das diferenças verificadas, já que as cotas não são relacionáveis.

		Média dos declives			
		Sulco 1	Sulco 2	Sulco 3	Sulco 4
Bloco 1	Declive inicial	2,28	2,31	2,32	2,35
	Declive final	2,35	2,36	2,31	2,41
	Diferença	*-0,07*	*-0,05*	*0,01*	*-0,05*
Bloco 2	Declive inicial	1,20	1,18	1,20	1,24
	Declive final	1,23	1,21	1,17	1,43
	Diferença	*-0,03*	*-0,03*	*0,03*	*-0,18*
Bloco 3	Declive inicial	1,43	1,43	1,45	1,51
	Declive final	1,48	1,43	1,43	1,37
	Diferença	*-0,05*	*0,00*	*0,02*	*0,14*

Quadro 5.1 - Evolução do declive longitudinal dos sulcos depois das 3 regas (calculado a partir da média dos declives dos vários troços de 5 m).

Através da análise do Quadro 5.1 podemos verificar que as regas não provocam grandes alterações no declive longitudinal dos sulcos. As maiores diferenças entre o declive inicial e final verificam-se nos sulcos 4 do Bloco 1 e do Bloco 3. No entanto nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 são nítidas as alterações da forma do perfil longitudinal introduzidas pelas regas. As regas parecem ter um efeito regularizador sobre o perfil atenuando as alterações de declive verificadas ao longo do sulco.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 representam as diferenças entre o declive de cada troço de 5 m de sulco, calculado a partir dos levantamentos efectuados antes e depois da realização dos ensaios de rega. Esta comparação entre os declives de cada troço do sulco, verificados antes e depois das regas, revela as alterações introduzidas ao longo do perfil pela rega. As maiores diferenças verificam-se no Bloco 1, nos sulcos 1 e 4 que a meio do sulco registam mesmo as diferenças mais elevadas de todos os blocos. No Bloco 2 as maiores diferença entre os declives aparecem no primeiro terço dos sulcos e evoluem do mesmo modo nos 4 sulcos, enquanto que nos troços finais os declives são mais aproximados e só os sulcos 1 e 2 apresenta maiores alterações. No Bloco 3 as maiores diferenças ocorrem no primeiro e no último terços dos sulcos 1 e 4. Os sulcos 3 e 4 apresentam declives muito semelhantes ao longo do sulco.

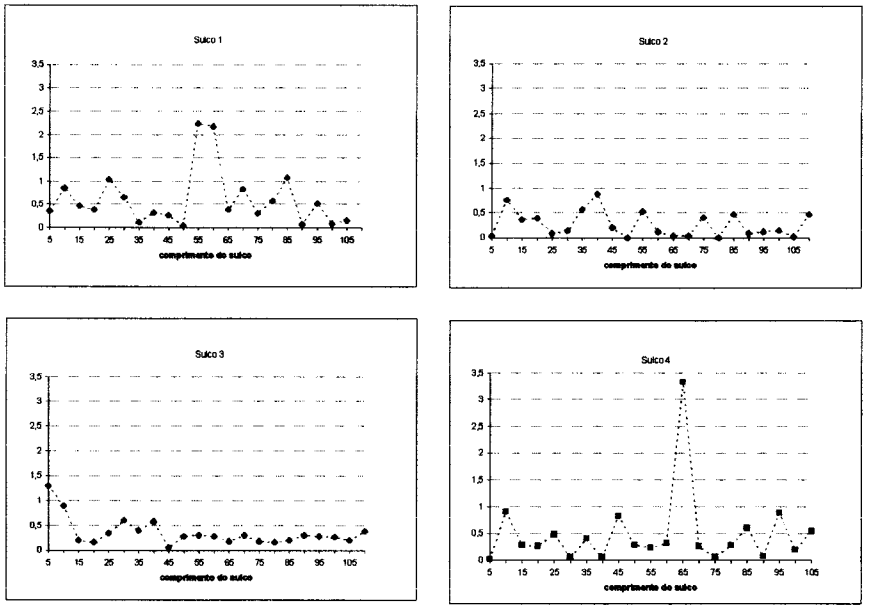


Figura 5.1 - Diferenças absolutas entre os declives, calculados antes e depois da realização das regas, para cada troço de 5 m de sulco, no Bloco 1.

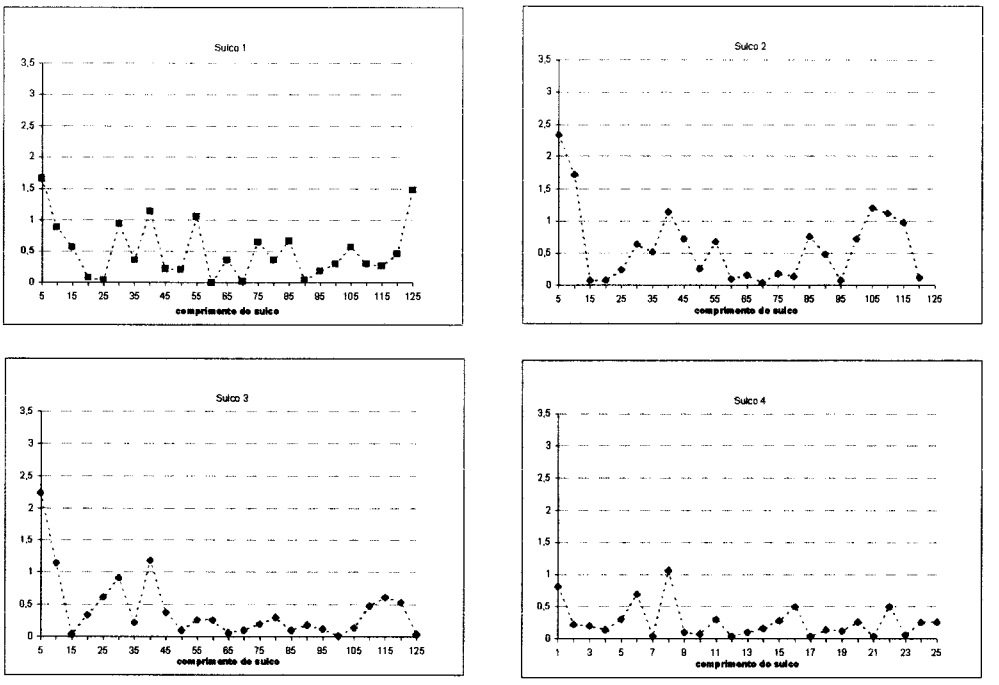


Figura 5.2 - Diferenças absolutas entre os declives, calculados antes e depois da realização das regas, para cada troço de 5 m de sulco, no Bloco 2.

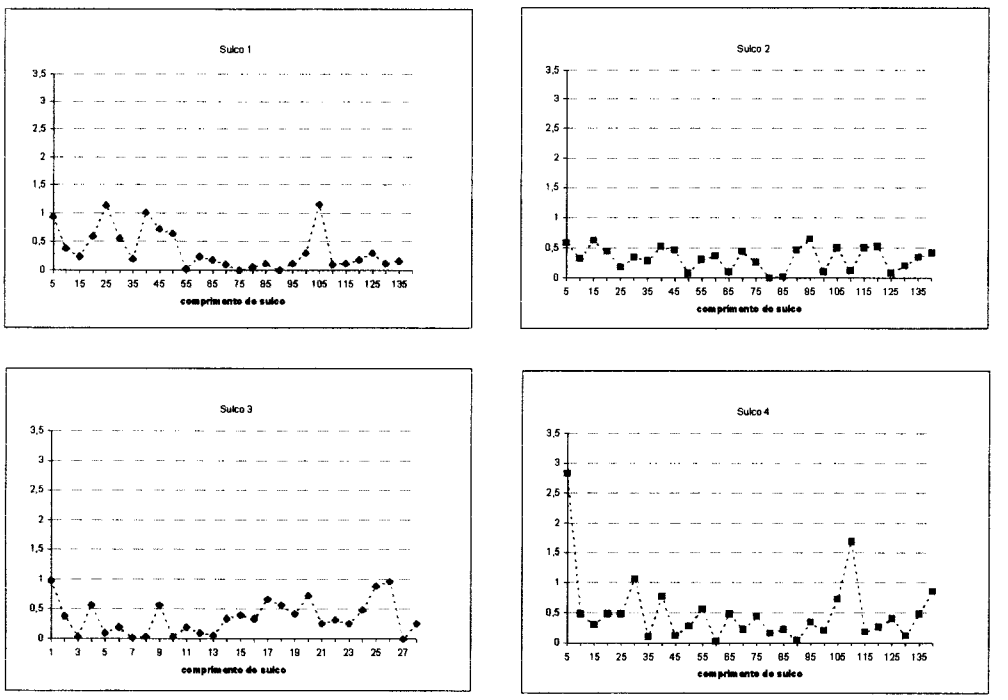
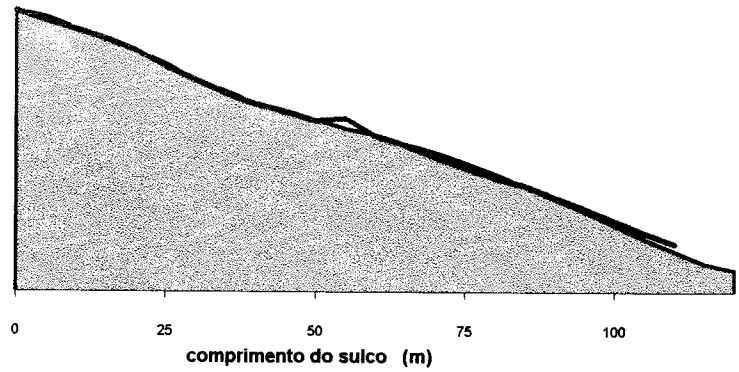
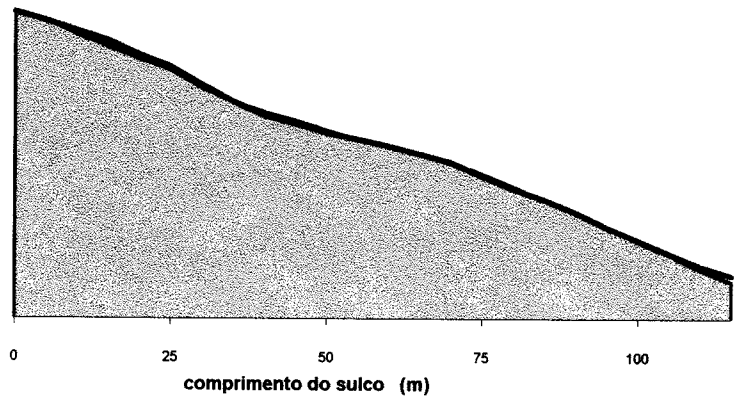
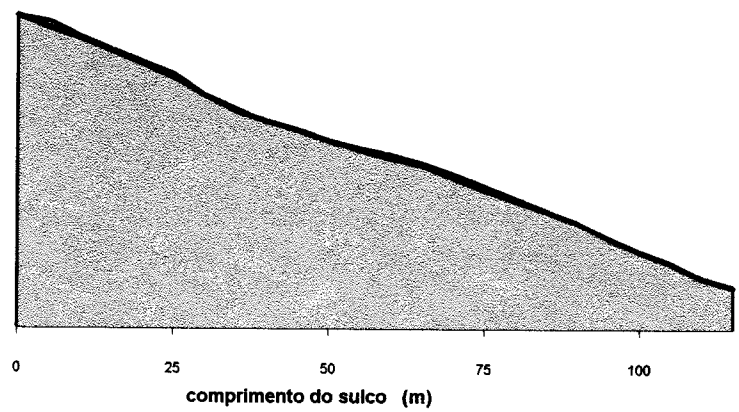


Figura 5.3 - Diferenças absolutas entre os declives, calculados antes e depois da realização das regas, para cada troço de 5 m de sulco, no Bloco 3.







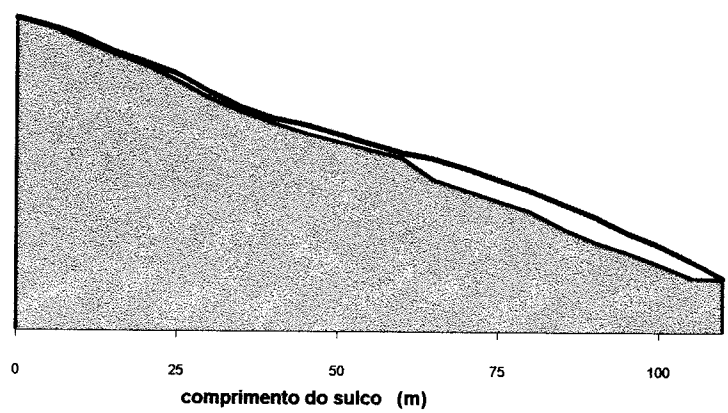


Figura 5.4 - Representação gráfica dos perfis longitudinais dos sulcos do Bloco 1: no início representado pela linha azul e no fim do ensaio representado pela linha a preto.

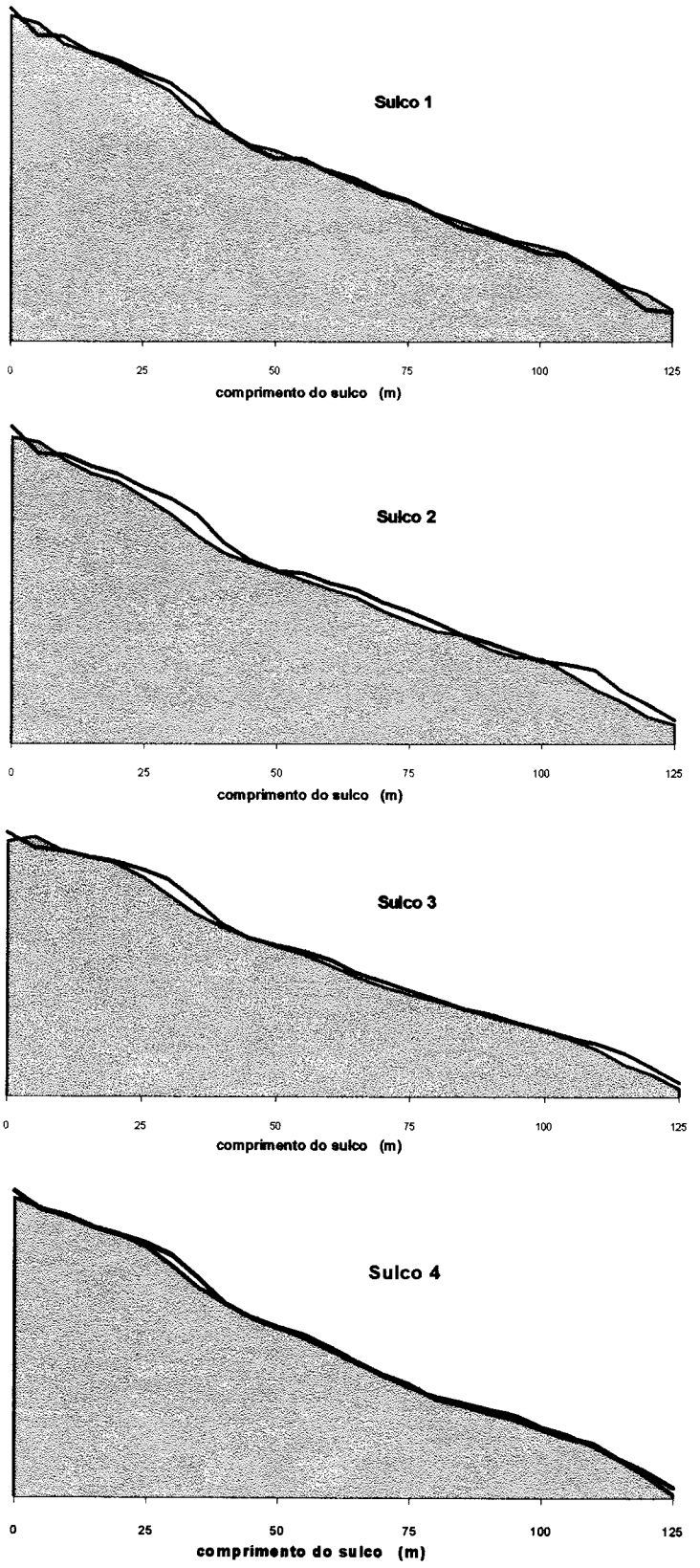


Figura 5.5 - Representação gráfica dos perfis longitudinais dos sulcos do Bloco 2: no ínicio representado pela linha vermelha e no fim do ensaio representado pela linha a preto.

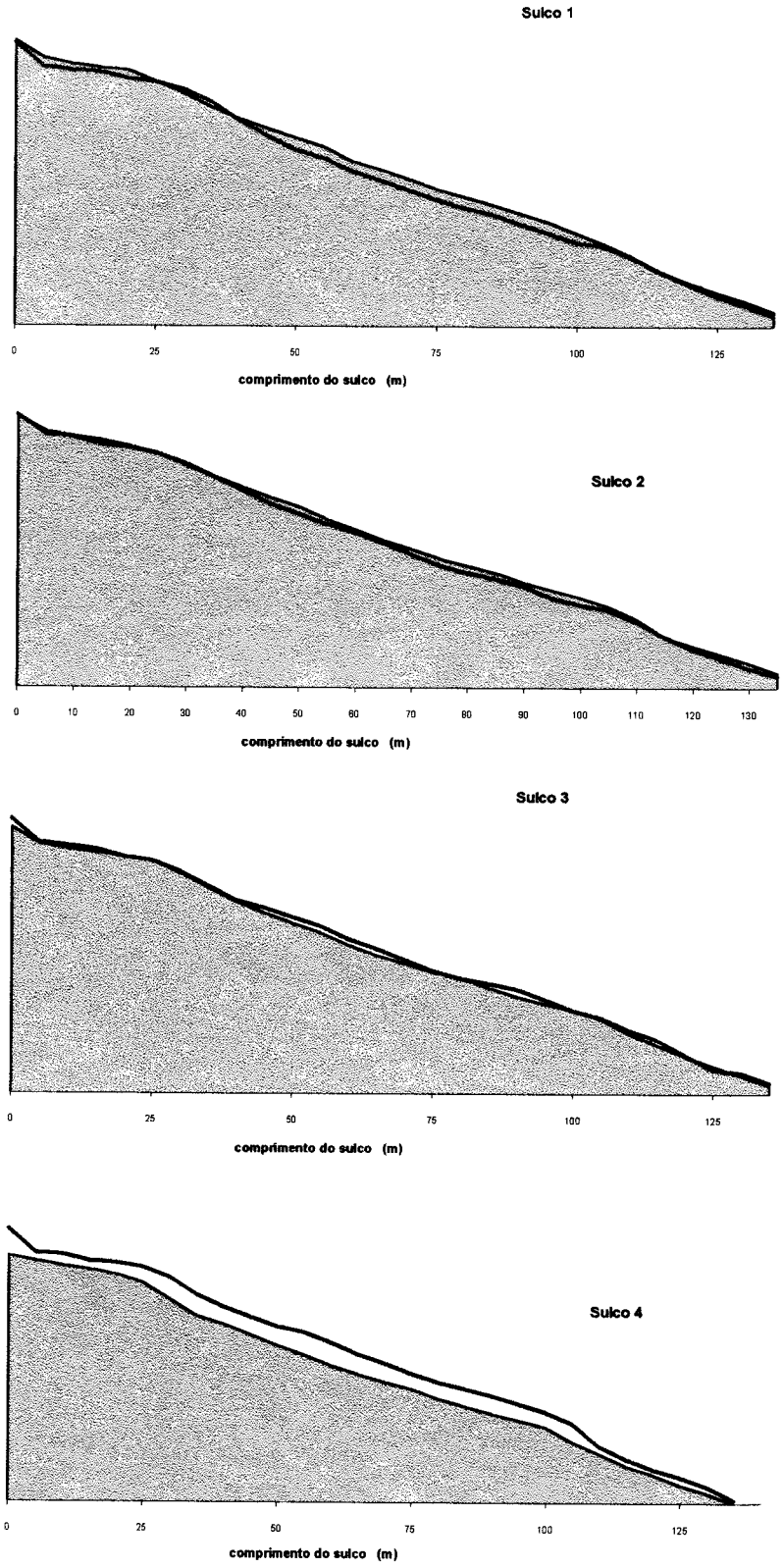


Figura 5.6 - Representação gráfica dos perfis longitudinais dos sulcos do Bloco 3: no início representados pela linha azul e no fim representados pela linha a preto.

5.2 Avaliação das regas realizadas

5.2.1 Caracterização do avanço

Os dados de avanço obtidos durante os ensaios de rega realizados foram utilizados para determinar os parâmetros p e r da equação (3.10). A determinação dos parâmetros da equação de avanço é realizada pelo programa ANREGA.

	Sulco nº	1ª Rega		2ª Rega		3ª Rega	
		p	r	p	r	p	r
Bloco 1	**1**	6,05	0,643	15,698	0,378	2,4	0,843
	2	8,618	0,527	10,101	0,438	3,289	0,634
	3	6,839	0,501	-	-	4,689	0,604
	4	6,916	0,578	12,727	0,395	4,653	0,628
Bloco 2	**1**	2,245	0,824	4,232	0,893	6,619	0,632
	2	2,74	0,826	3,569	0,901	8,854	0,475
	3	1,667	0,979	4,331	0,883	8,1	0,576
	4	10,127	0,476	14,876	0,444	-	-
	1	17,745	0,45	11,547	0,526	12,605	0,432
Bloco 3	**2**	11,26	0,6	6,894	0,733	10,447	0,588
	3	24,473	0,361	-	-	4,606	0,615
	4	21,972	0,36	13,524	0,522	12,35	0,495

Quadro 5.2 - Parâmetros da equação de avanço $x = p\, t_x^{\,r}$.

Analisando os valores obtidos no Quadro 5.2 pode verificar-se que os grupos de sulcos pertencentes ao mesmo bloco apresentam, para cada rega, valores de p e r da mesma ordem de grandeza, constituindo o sulco 4 do Bloco 2 e os sulcos 2 e 3 do Bloco 3 excepção. A variabilidade dos parâmetros da equação de avanço em sulcos com o mesmo declive mostra que o avanço é influenciado por outras características do sulco como o caudal, a rugosidade, o perímetro molhado e a área da secção transversal

Nas duas primeiras regas os valores do coeficiente da equação de avanço verificados no Bloco 1 e 3 são mais elevados do que os do Bloco 2, verificando-se o contrário para os valores do expoente r. No Bloco 2 os valores obtidos para o expoente estão próximos da

unidade, revelando curvas de avanço, por vezes, muito lineares, em que a velocidade de avanço diminui muito pouco ao longo do sulco. Este comportamento é uma manifestação da influência das características do perfil do solo no avanço que Serralheiro, 1988, designou por "efeito argiluviado".

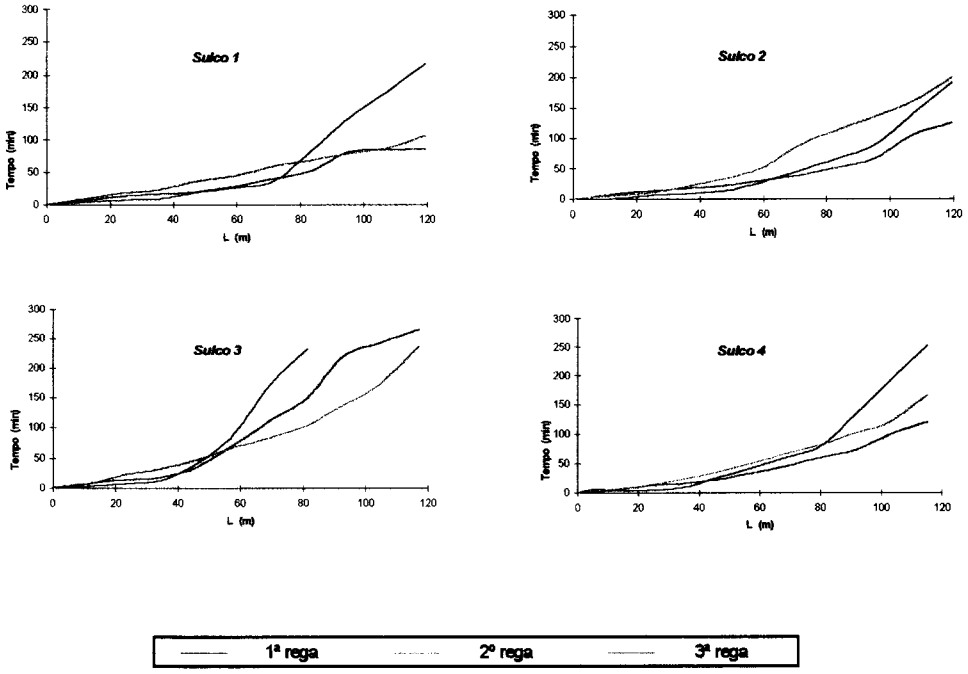


Figura 5.7 - Comparação entre os tempos de avanço verificados durante as 3 regas realizadas no Bloco 1.

No conjunto de sulcos em que o declive é mais acentuado (Figura 5.7), Bloco 1, o tempo de avanço aumenta significativamente na segunda rega, verificando-se uma diminuição acentuada da velocidade de avanço no último terço dos sulcos. Na terceira rega no sulcos 1 e 4 os tempos de avanço diminuem e a velocidade de avanço é quase constante ao longo do sulco, enquanto que no sulco 2 se verifica um aumento. Na primeira rega o sulco 3 apresenta um avanço muito lento que se agrava na 2ª rega não atingindo o fim do sulco, na 3ª rega a água leva menos 30 minutos a atingir o fim do sulco.

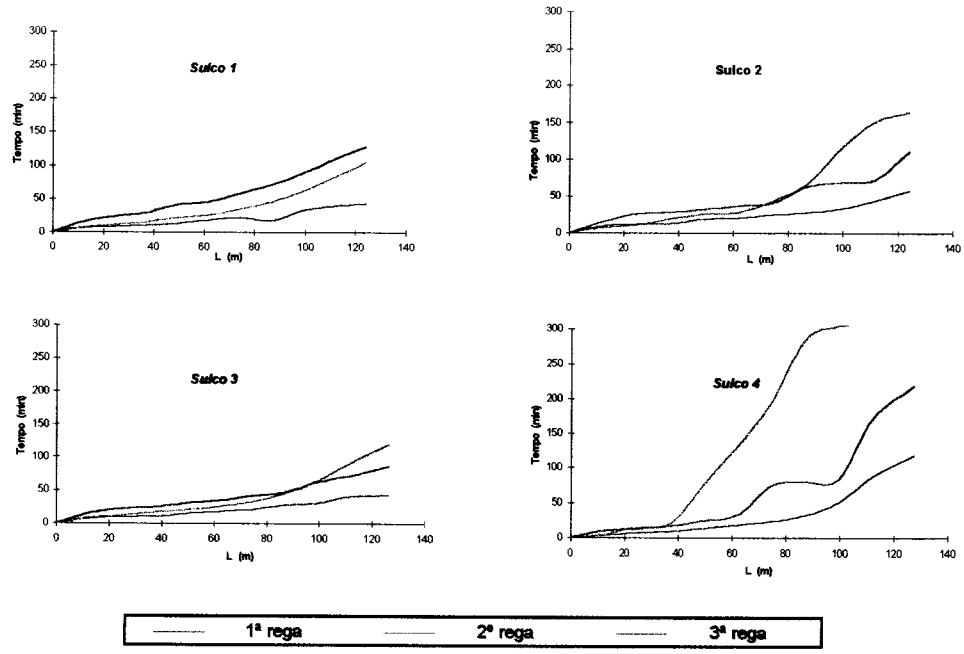


Figura 5.8 - Comparação entre os tempos de avanço verificados durante as 3 regas realizadas no Bloco 2.

No conjunto de sulcos que apresenta menor declive (Figura 5.8), Bloco 2, nas duas primeiras regas os sulcos 1, 2 e 3 apresentam curvas de avanço quase lineares, verificando-se uma diminuição acentuada do tempo de avanço da primeira para a segunda rega. Na terceira rega as curvas perdem a linearidade refletindo um avanço inicial rápido que diminui ao longo da rega e um tempo de avanço mais lento que na primeira rega. Esta alteração da velocidade de avanço ao longo do sulco manifesta-se no valor de *r* que é bastante inferior ao verificado nas regas anteriores. O comportamento do sulco 4 difere dos restantes com tempos de avanço mais elevados. Na primeira rega o tempo de avanço é muito elevado e, como demonstra o pequeno valor de *r*, resulta da combinação de diversas velocidades de avanço verificadas ao longo da rega, que se podem relacionar com a irregularidade do perfil longitudinal do sulco. Na segunda rega o tempo de avanço é bastante inferior. Na terceira rega o tempo de avanço aumenta de tal modo que a água fornecida não atinge o fim do sulco durante as 5 horas que dura a rega. Esta variação do tempo de infiltração parece sugerir uma alternância das condições da superfície do solo. Na 3ª rega o efeito da crosta parece ter sido reduzido pelo desgaste verificado durante a 2ª rega, permitindo uma maior infiltrabilidade que se reflete no aumento do volume infiltrado e do tempo de avanço.

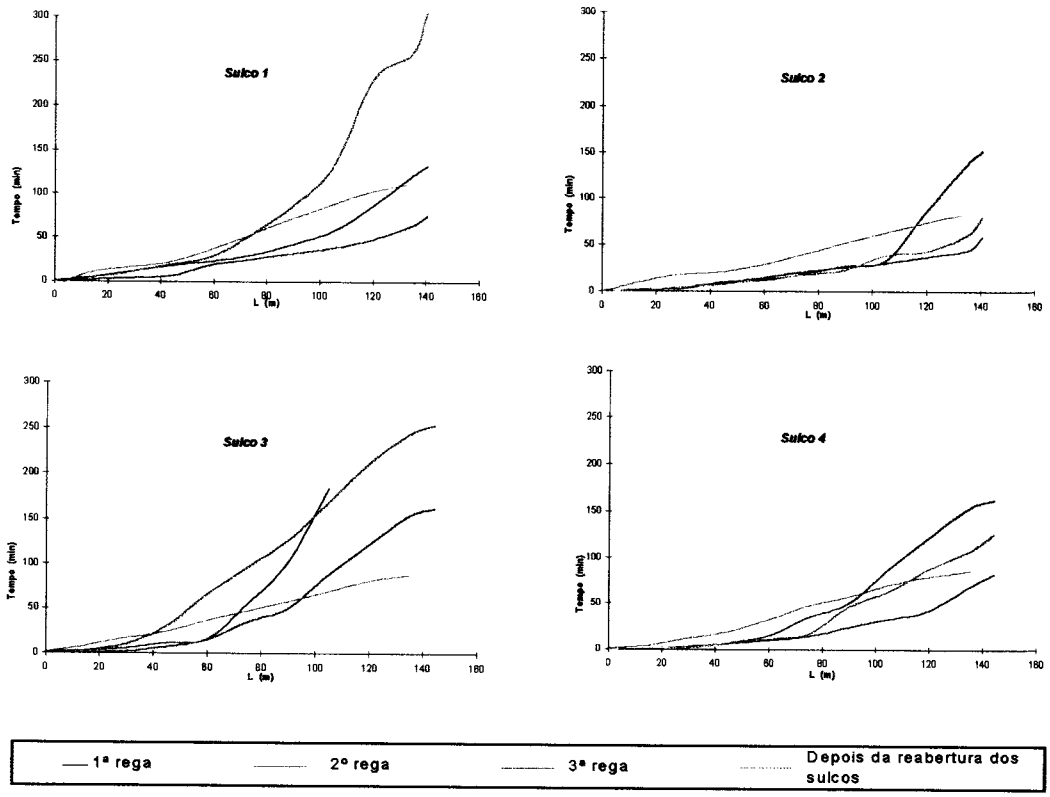


Figura 5.9 - Comparação entre os tempos de avanço verificados durante as 4 regas realizadas no Bloco 3.

No Bloco 3 (Figura 5.9) o sulco 1 apresenta um tempo de avanço reduzido que duplica na 2ª rega e se torna muito lento na 3ª rega. Nos sulcos 2 e 4 o tempo de avanço diminui na 2ª rega, para na 3ª rega se verificar um ligeiro aumento. No sulco 3, na 1ª rega o avanço é muito lento a partir dos 100 m, na 2ª rega a água não ultrapassa esta distância e na 3ª rega a água avança muito lentamente logo a partir dos 20 m. A forma do perfil transversal parece explicar o avanço da água ao longo deste sulco, já que nestes dois pontos há uma elevação da superfície do sulco.

No Bloco 3, depois de realizadas as 3 regas referidas, os sulcos foram reabertos e foi realizada uma rega adicional. Os parâmetro das equações de avanço que caracterizam esta rega são apresentados no Quadro 5.3. Em todos os sulcos se verificam curvas de avanço muito lineares e tempos de avanço que no início da rega são mais lentos que os da 1ª, 2ª e 3ª regas. No sulco 3 a água não atinge o fim do sulco.

	Sulco nº	p	r
Bloco 3	1	5,018	0,688
	2	3,645	0,82
	3	2,492	0,901
	4	6,088	0,697

Quadro 5.3 - Parâmetros da equação de avanço da rega realizada após a reabertura dos sulcos no Bloco 3.

Nos 3 blocos as curvas de avanço apresentadas mostram que não existe um padrão de comportamento na evolução dos tempo de avanço com o número de regas realizadas. Este comportamento irregular do avanço ao longo das regas deve-se provalvelmente a alterações da superfície do sulco por erosão local que condicionam o avanço da água.

Os pequenos caudais praticados em todas as regas e a infiltração inicial elevada fazem com que o caudal que avança sobre o sulco seja reduzido e por isso mais afectado pelos obstáculos que resultam das alterações da forma da secção transversal.

As condições do avanço estão directamente relacionadas com as características de infiltração dos sulcos. Assim nos sulcos em que se verificaram curvas de avanço muito lineares as equações de infiltração apresentam expoentes com um valor muito baixo e que traduzem uma infiltração inicial elevada que diminue bruscamente estabilizando num valor muito reduzido.

Os valores do expoente da equação de avanço superiores a cerca de 0,7 traduzem uma linearidade da curva de avanço que não se adapta às restrições de não linearidade exigidas pelo método de Elliot e Walker, 1982, utilizado para calcular os parâmetros das equações de infiltração, que vão perdendo fiabilidade à medida que a linearidade do avanço é maior.

5.2.2 *Caracterização da infiltração*

Para caracterizar a infiltração, nas regas realizadas durante o trabalho de campo desenvolvido, foram utilizadas as equações de Kostiakov. Segundo Serralheiro, 1988 e 1995, estas equações são as que melhor se adaptam às características da infiltração nos solos argiluviados.

As equações de infiltração foram calculadas pelo programa ANREGA a partir dos dados de avanço das regas e são apresentadas no Quadro 5.4.

Os volumes calculados para as 3 regas realizadas em cada uma das modalidades são apresentados no Anexo 8.1, 8.2 e 8.3.

	Sulco nº	1ª Rega		2ª Rega		3ª Rega	
		k	a	k	a	k	a
Bloco 1	**1**	1,736	0,416	0,713	0,686	8,496	0,169
	2	1,542	0,52	1,581	0,602	6,108	0,382
	3	2,741	0,522	-	-	3,674	0,419
	4	2,806	0,47	1,115	0,652	3,804	0,402
Bloco 2	**1**	17,337	0,19	14,945	0,166	4,005	0,419
	2	9,964	0,193	15,321	0,107	2,637	0,561
	3	28,4	0,02	3,795	0,121	1,785	0,499
	4	2,784	0,563	1,65	0,643	-	-
Bloco 3	**1**	1,345	0,647	-	-	2,293	0,603
	2	2,834	0,495	-	-	3,667	0,474
	3	0,823	0,754	-	-	8,622	0,405
	4	1,101	0,715	-	-	1,986	0,567

Quadro 5.4 - Parâmetros da equação de Kostiakov $Z = k \cdot t^a$.

Analisando no Quadro 5.4 os parâmetros obtidos para as duas primeiras regas, verifica-se que nos Blocos 1 e 3 os coeficientes das equações de infiltração são muito baixos e os expoentes elevados. Estas características refletem um infiltração inicial reduzida, mas uma infiltrabilidade que se mantém relativamente elevada, situação que é pouco vulgar encontrar-se nos solos argiluviados. Nestes sulcos o avanço é pouco linear e é menos evidente o efeito argiluviado.

No Bloco 2 para as mesmas regas os coeficientes são elevados e os expoentes baixos, reflectindo um aumento da infiltração inicialmente muito rápido, que diminue bruscamente após os primeiros 20 minutos, quando a infiltrabilidade estabiliza num valor muito reduzido. Neste comportamento, também referido por Serralheiro, 1988 e 1995, manifestam-se nitidamente as particularidades da infiltração nos solos argiluviados. Associado a este comportamento, nos sulcos em que o valor dos expoentes é mais baixo, foram registados os mais elevados volumes excedentes verificados durante os ensaios.

No sulco 4 o avanço da água no sulco é mais lento e com grandes alterações da velocidade, verificando-se um aumento do volume infiltrado ao longo do tempo traduzido por uma equação com um coeficiente baixo e o expoente elevado.

Na 3ª rega do Bloco 2 o efeito argiluviado é menos acentuado, verificando-se uma diminuição do valor do coeficiente e um aumento do expoente para um valor "normal" à volta de 0,5, a sugerir uma homogeneidade inesperada do perfil do solo quanto a condições de infiltração.

	Sulco nº	k	a
Bloco 3	1	2,211	0,351
	2	7,983	0,228
	3	19,394	0,101
	4	3,561	0,367

Quadro 5.5 - Parâmetros da equação de Kostiakov para rega realizada após a reabertura dos sulcos no Bloco 3.

No Bloco 3 a rega realizada após a abertura dos sulcos apresenta em relação à infiltração (e ao avanço) um comportamento típico dos solos argiluviados, com uma infiltrabilidade inicialmente elevada que passa para valores muito reduzidos após os primeiros minutos de rega. O volume total infiltrado não atinge os das restantes regas, apesar do valor da infiltração inicial ser aproximado ou superior e de nos sulcos 1 e 2 se verificarem tempos de avanço mais elevados. Nesta rega a alteração das condições da superfície infiltrante contribui para acentuar o efeito argiluviado.

Neste Bloco as primeiras regas dos sulcos 3 e 4 e no Bloco 1 a segunda rega do sulco 1 apresentam, para a infiltração, um comportamento próximo do verificado num solo com um perfil mais homogéneo.

Em todas as regas é nítida a relação existente entre o avanço e a infiltração.

A influência da ordem de rega não parece verificar-se no conjunto dos ensaios realizados. Reflectindo o que se verificou em relação ao tempo de avanço, também para a infiltração acumulada não se verifica qualquer padrão de comportamento na sua evolução com a sequência das regas.

Nalgumas regas dos Blocos 1 e 3 em que o efeito argiluviado é pouco ou nada acentuado são outros factores que não as características do solo que condicionam a infiltração. Neste caso, serão outros factores do escoamento (declive, caudal, dimensões da secção transversal, rugosidade) que determinam este comportamento.

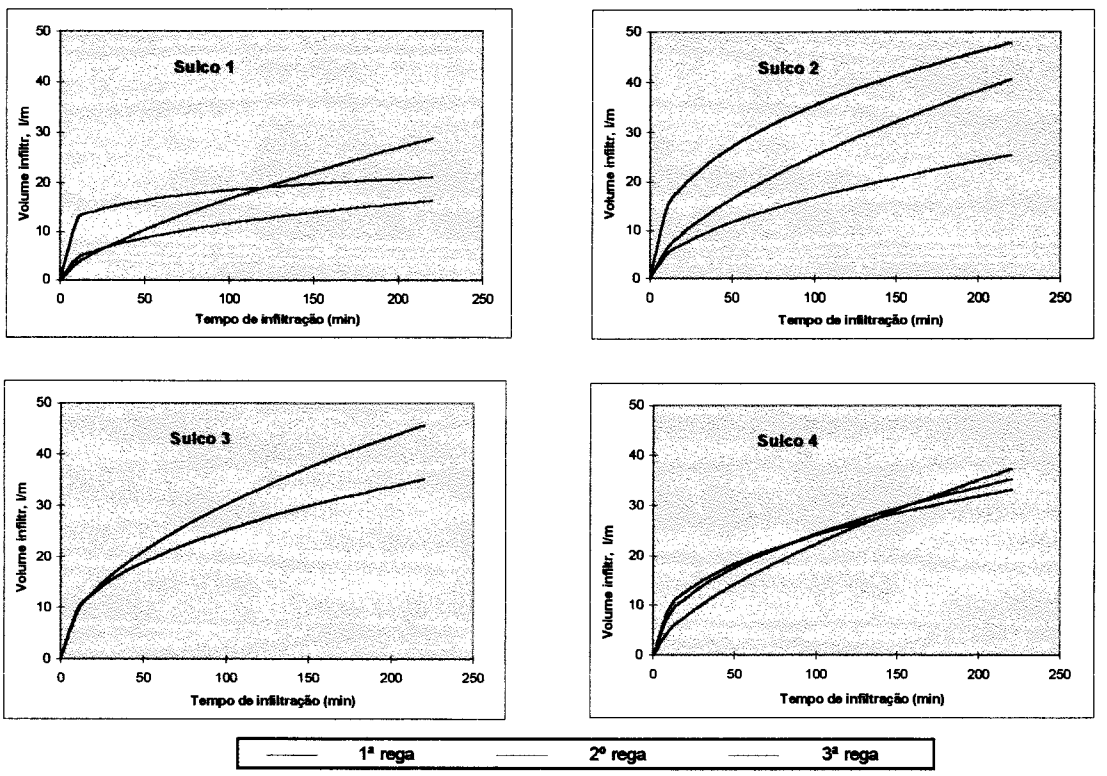


Figura 5.10 - Representação gráfica das equações de infiltração obtidas para o Bloco 1.

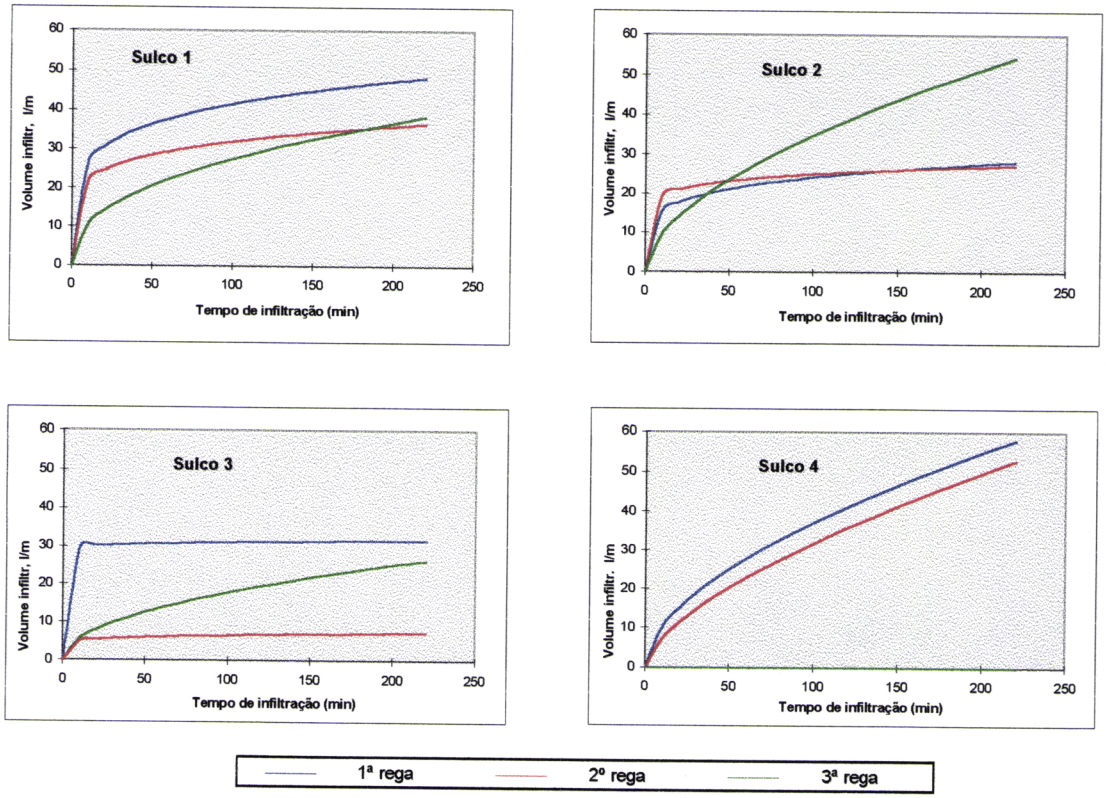


Figura 5.11 - Representação gráfica das equações de infiltração obtidas para o Bloco 2.

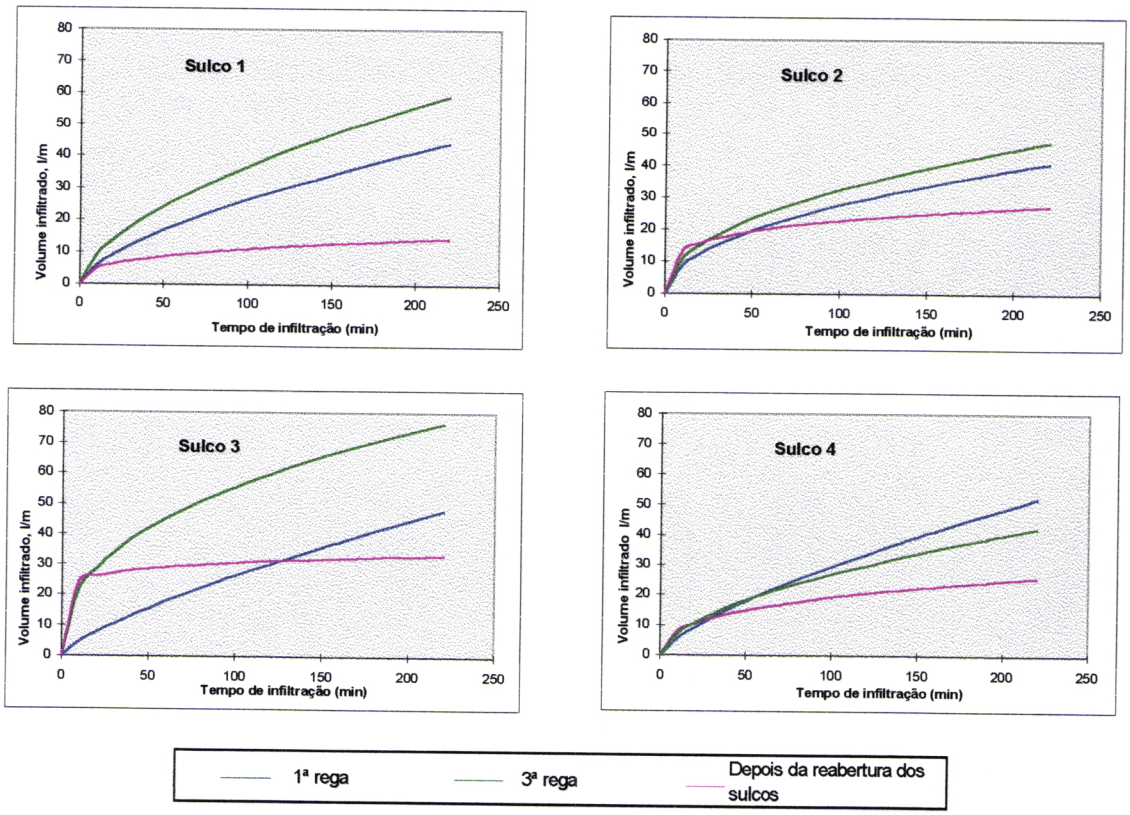


Figura 5.12 - Representação gráfica das equações de infiltração obtidas para o Bloco 3.

5.3 Avaliação da perda de sedimentos

Os valores calculados, a partir dos dados obtidos durante o ensaio, para a perda de sedimentos por hectare são apresentados no Quadro 5.6.

Embora se registe, na primeira e na terceira regas, uma tendência para a verificação de valores mais elevados no bloco que apresenta maiores declives, não existem diferenças significativas entre os valores obtidos para os 3 blocos. Na segunda rega é nos sulcos do Bloco 2 que se verificam os valores mais elevados de perda de sedimentos no fim do sulco.

No Bloco 2 o sulco 3 apresenta, em todas as regas, valores muito elevados que se afastam dos verificados para os sulcos do mesmo bloco. Na primeira e na segunda regas registam-se mesmo os valores máximos obtidos durante o ensaio. Esta situação deve-se provavelmente às características da infiltração e à forma do perfil longitudinal do sulco, que permitiram um avanço muito rápido e um volume de escoamento final elevado.

	Sulco nº	Rega após mobilização dos sulcos	1º Rega	2º Rega	3º Rega
Bloco 1	**1**	-	0,082	0,029	0,160
	2	-	0,095	0,021	0,012
	3	-	0,263	-	0,017
	4	-	0,082	0,021	0,079
Bloco 2	**1**	-	0,005	0,088	0,002
	2	-	0,075	0,064	0,001
	3	-	0,312	0,730	0,016
	4	-	0,113	0,097	-
Bloco 3	**1**	0,432	0,028	-	0,003
	2	0,408	0,030	-	0,024
	3	0,108	0,003	-	0,007
	4	0,505	0,006	-	0,030

Quadro 5.6 - Sedimentos arrastados por área (ton/ha) em cada sulco.

No sulco 3 estes valores correspondem não só a volumes excedentes elevados mas também a concentrações de sedimentos por litro de água muito elevados (Anexos 8 e 9). No sulco 2 os volumes excedentes são elevados mas a concentração de sedimentos por litro é baixa, reflectindo uma infiltração típica dos solos argiluviados e um avanço com algumas

alterações de velocidade ao longo do sulco. No sulco 4 os volumes excedentes são reduzidos porque a infiltrabilidade se mantém relatimente elevada ao longo das regas, mas a concentração de sedimentos por litro de água apresenta valores elevados. As diferenças verificadas entre as perdas de sedimentos nos 3 sulcos demonstram que a intensidade da erosão depende da quantidade de material fornecido pelo destacamento e da capacidade de transporte do escoamento (Morgan, 1986).

Os valores obtidos na rega realizada após a abertura dos sulcos têm uma ordem de grandeza muito superior à verificada nas restantes regas efectuadas, traduzindo o efeito das condições da superfície do solo na erosividade da rega. Brown *et al*, 1988, .refere que a crosta que se forma na superfície, do solo por acumulação de pequenas partículas destacadas pelo escoamento, reduz a erosão.

Na 3ª rega os valores verificados no sulco 1 do Bloco 1 foram provocados pela alteração das condições da superfície do solo, provocadas pela passagem de animais. A quebra da crosta condicionou as características da infiltração, permitindo uma infiltração inicial muito elevada que estabiliza num valor muito reduzido, provocando assim elevadas perdas de água no fim do sulco.

As Figura 5.13, 5.14 e 5.15 representam gráficamente, para cada sulco, a evolução da perda de sedimentos por unidade de área verificada nos sulcos ao longo da época de rega. Através da análise dos valores obtidos podemos verificar que existem diferenças marcadas entre as várias regas em todos os blocos, existindo a tendência para a diminuição da perda de sedimentos com o número de regas.

Brown *et al*, 1995, referem que existem diferenças na perda de sedimentos ao longo da época de rega, afirmando que estas alterações não resultam apenas do efeito da cultura mas também de uma combinação de alterações sazonais da erodibilidade do solo, da infiltração e do crescimento de plantas no sulco.

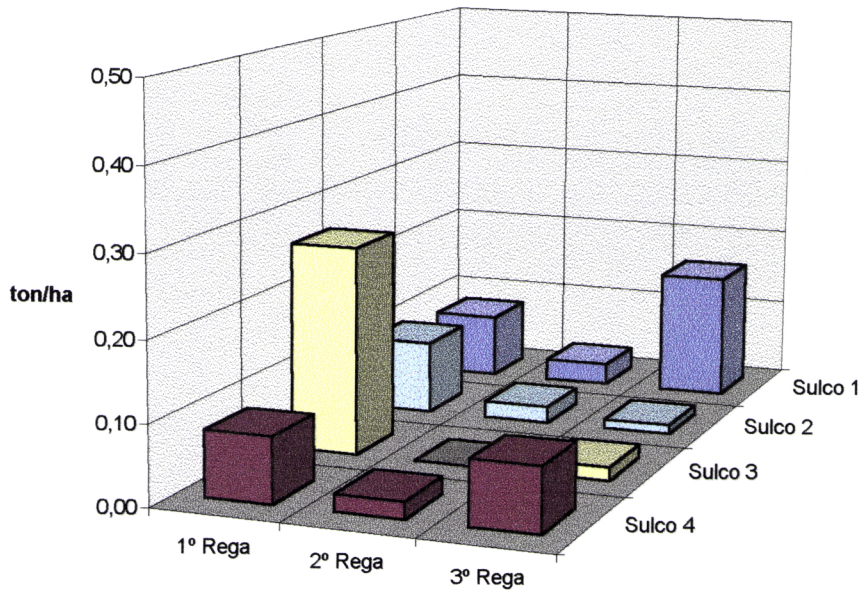


Figura 5.13 - Evolução da perda de sedimentos no Bloco 1.

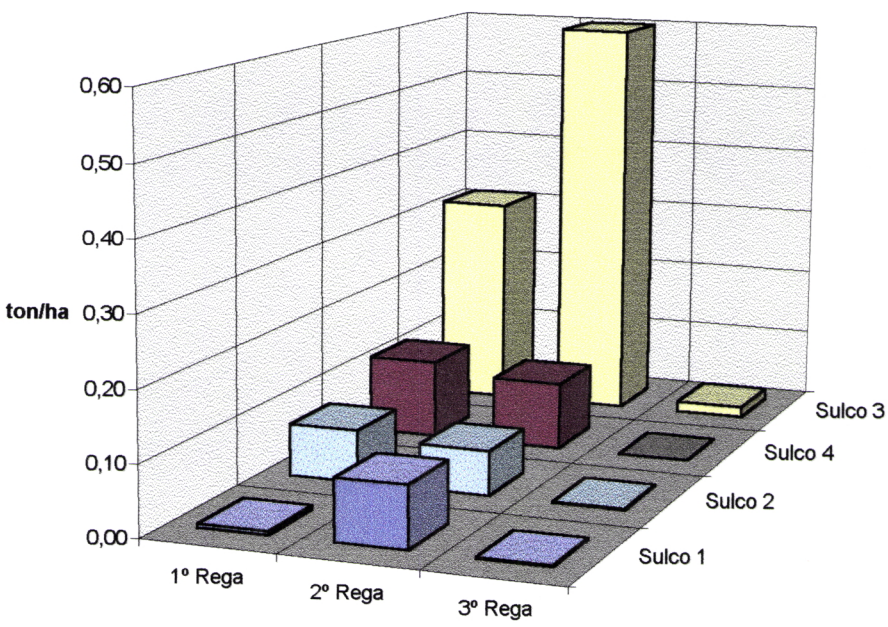


Figura 5.14 - Evolução da perda de sedimentos no Bloco 2.

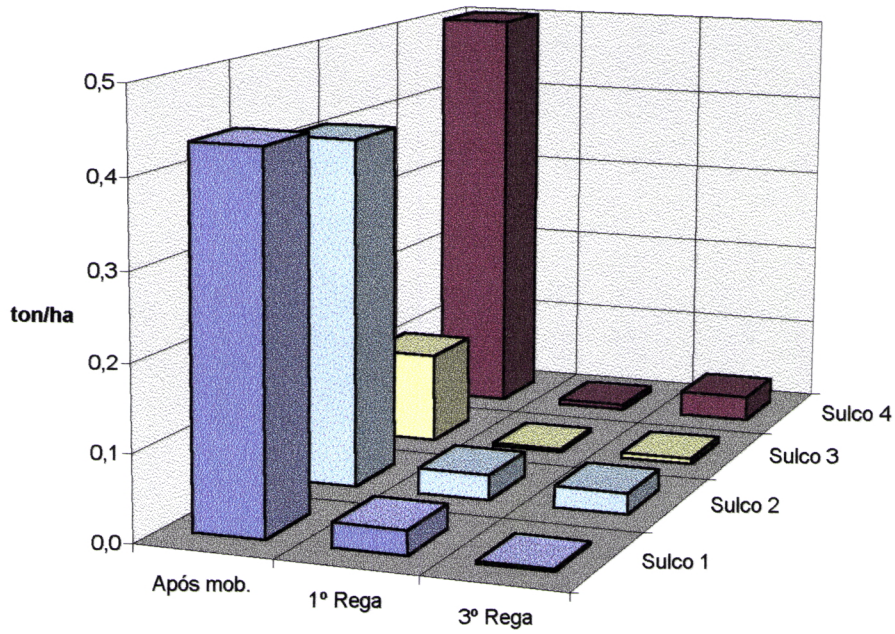


Figura 5.15 - Evolução da perda de sedimentos no Bloco 3.

5.3.1 Análise estatística

Através da análise das componentes principais foi avaliada a influência dos diversos factores na perda de sedimentos. Esta técnica transforma as variáveis independentes em novas variáveis, designadas por "componentes" que são funções lineares das variáveis originais e independentes estatísticamente. A análise das componentes principais é uma análise multidimensional que permite visualizar a distribuição dos resultados obtidos em relação a um conjunto de eixos que representam no espaço, os diversos factores considerados na avaliação da perda de sedimentos (componentes).

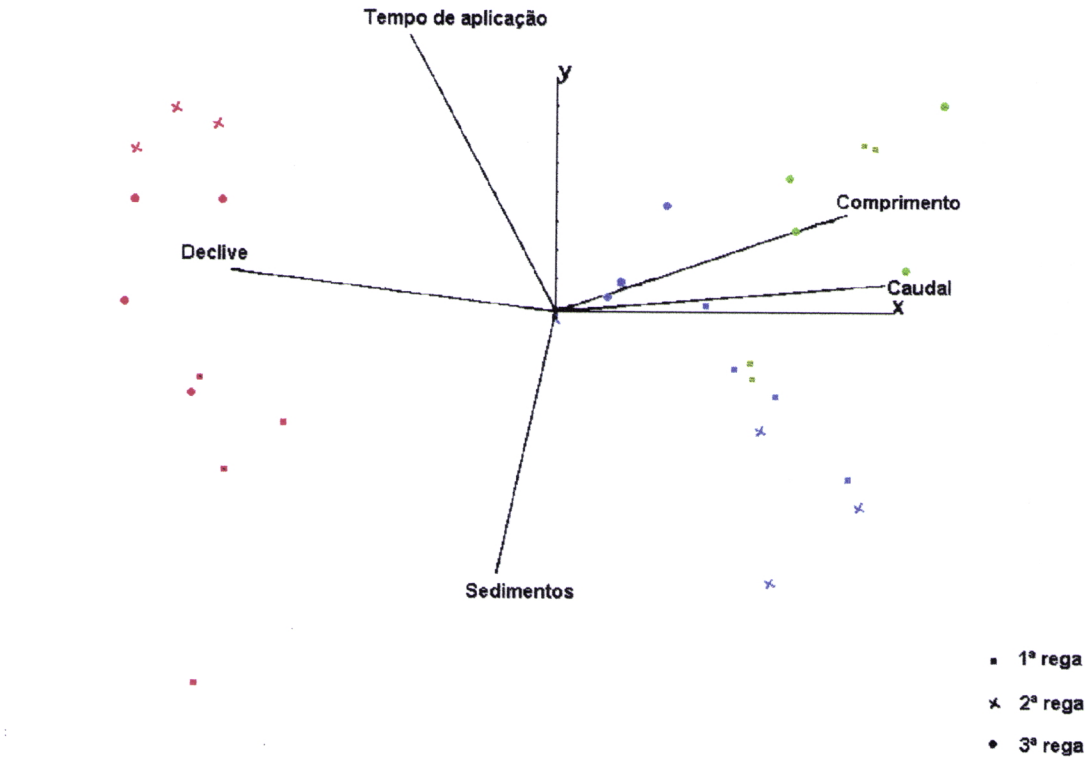


Figura 5.16 - Localização das componentes no espaço. A vermelho representam-se os pontos do Bloco 1, a azul o Bloco 2 e a verde o Bloco 3.

	Componentes				
	Declive	**Caudal**	**Compr. do sulco**	**Tempo de aplicação**	**Sedimentos**
Valor das componentes	2,506	1,2738	0,8345	0,2342	0,1515
Percentagem	50,1201	25,476	16,6898	4,6845	3,0296
Vectores componentes					
Declive	-0,57099	0,10244	0,29141	0,36628	0,66663
Caudal	0,57755	0,07257	0,24208	-0,45595	0,62823
Compr. do sulco	0,5142	0,25203	0,41047	0,69186	-0,15787
Tempo de aplicação	-0,25701	0,69609	0,44649	-0,39687	-0,30422
Sedimentos	-0,09976	-0,66044	0,69902	-0,14756	-0,20845

Quadro 5.7 - Resultados da análise das componentes principais.

Os eixos que apresentam maior significância são os que representam o caudal e o declive. A distribuição no espaço dos pontos que representam cada rega realizada é condicionada por estes dois eixos, a sua posição relativa mostra que o declive e o caudal têm efeitos antagónicos traduzindo o facto de se terem utilizado caudais ajustados ao declive. O mesmo acontece com o tempo de aplicação e com a perda de sedimentos.

O grau de correlação entre as componentes e as variáveis é dado pelo valor dos vectores componentes. As correlações mais elevadas verificam-se entre a componente que representa o comprimento do sulco e a variável sedimentos, entre a componente que representa o caudal e a variável tempo de aplicação e entre a componente que representa o tempo de aplicação e a variável comprimento do sulco. No entanto a intensidade destas correlações não é muito elevado.

A análise das componentes principais mostra que não é possível, a partir destes resultados, definir a massa de sedimentos arrastados em função do comprimento do sulco, do caudal, do declive e do tempo de aplicação.

Optou-se assim por fazer a avaliação dos resultados obtidos através da análise de variância.

Termos	Estimativa	Erro standart	t	Prob>[t]
Interacções	1564,2341	399,702	3,91	0,0006
Blocos	-243,8442	146,746	-1,66	0,1086
Regas	-275,0245	132,382	-2,08	0,0478

Quadro 5.8 - Resultados da análise de variância.

À amostra inicial foram retirados 3 valores por se considerarem pontos aberrantes, com um grande desvio em relação à média: do Bloco 1 na 1ª rega o sulco 3 e do Bloco 2 na 1ª e na 2ª regas o sulco 3.

A análise de variância mostra que não são significativas as diferenças entre os valores de perda de sedimentos entre os Blocos e que os valores obtidos para as 3 regas realizadas apresentam diferenças com um nível de significância de 0,05.

Estes resultados mostram que o declive não influencia a perda de sedimentos, mas revelam a existência de diferenças significativas na perda de sedimentos ao longo da época de rega (Figura 5.17).

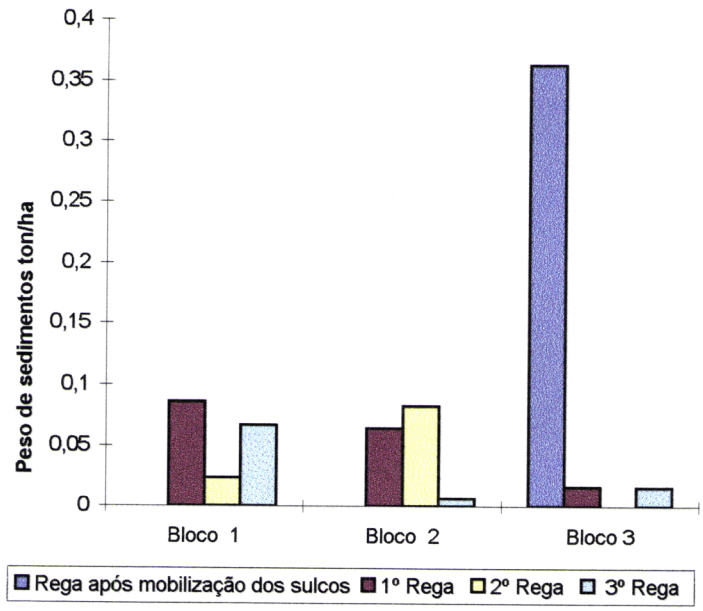


Figura 5.17 - Perda de sedimentos.

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal (l/s)	Tempo de aplicação	Volume aplicado	Volume final	Perda de Sedimentos (g)	(g/m2)	(ton/ha)
Bloco 1	**1**	2,3	119,4	0,2	239	2294	392	737,26	8,23	**0,08**
	2	2,4	119,5	0,2	256,0	3533	737	847,58	9,46	**0,09**
	3	2,3	117,1	0,3	277,0	5152	*421	2303,66	26,25	**0,26**
	4	2,3	115,1	0,3	242,0	4356	580	704,05	8,16	**0,08**
Bloco 2	**1**	1,2	124,1	0,4	255,0	5967	236	45,65	0,49	**0,00**
	2	1,2	124,8	0,4	230,0	4968	1658	701,76	7,50	**0,07**
	3	1,2	126,2	0,5	206,0	5809	2019	2956,46	31,24	**0,31**
	4	1,2	127,3	0,5	278,0	8006	474	1079,86	11,31	**0,11**
Bloco 3	**1**	1,5	140,1	0,4	270,0	7128	123	298,85	2,84	**0,03**
	2	1,5	140,9	0,4	270,0	6642	116	312,64	2,96	**0,03**
	3	1,5	143,6	0,5	302,0	8516	74	31,30	0,29	**0,00**
	4	1,5	143,8	0,5	312,0	8986	86	59,75	0,55	**0,01**

Quadro 5.9 - Perda de sedimentos durante a 1ª rega.

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal (l/s)	Tempo de aplicação	Volume aplicado	Volume final	Perda de Sedimentos (g)	(g/m2)	(ton/ha)
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,2	349	4816	571	257,53	2,88	0,03
	2	2,4	119,5	0,3	349	5863	633	189,45	2,11	0,02
	3	2,3	117,1	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00
	4	2,3	115,1	0,3	368	5741	591	180,81	2,09	0,02
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,5	181	5104	5	816,52	8,77	0,09
	2	1,2	124,8	0,4	203	4263	1037	596,37	6,37	0,06
	3	1,2	126,2	0,4	180	4212	3335	6908,66	72,99	0,73
	4	1,2	127,3	0,5	202	6060	509	927,30	9,71	0,10
Bloco 3	1	1,5	140,1	-	261	-	-	-	-	-
	2	1,5	140,9	0,4	190	-	-	-	-	-
	3	1,5	143,6	-	-	-	-	-	-	-
	4	1,5	143,8	0,5	222	-	-	-	-	-

Quadro 5.10 - Perda de sedimentos durante a 2ª rega.

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal (l/s)	Tempo de aplicação	Volume aplicado	Volume final	Perda de Sedimentos (g)	(g/m2)	(ton/ha)
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,2	274,0	3452	819	1433,50	16,01	0,16
	2	2,4	119,5	0,3	330,0	5544	137	106,01	1,18	0,01
	3	2,3	117,1	0,2	330,0	4752	267	147,43	1,68	0,02
	4	2,3	115,1	0,2	309,0	4450	566	684,77	7,93	0,08
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,3	262,0	4873	100	14,88	0,16	0,00
	2	1,2	124,8	0,4	303,0	6727	132	13,21	0,14	0,00
	3	1,2	126,2	0,3	268,0	4181	882	149,68	1,58	0,02
	4	1,2	127,3	-	-	-	-	-	-	-
Bloco 3	1	1,5	140,1	-	322,0	8694	13	26,50	0,25	0,00
	2	1,5	140,9	0,5	244,0	7613	560	256,48	2,43	0,02
	3	1,5	143,6	0,6	323,0	11434	156	70,84	0,66	0,01
	4	1,5	143,8	0,4	294,0	7409	629	323,16	3,00	0,03

Quadro 5.11 - Perda de sedimentos durante a 3ª rega.

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal (l/s)	Tempo de aplicação	Volume aplicado	Volume final	Perda de Sedimentos (g)	(g/m2)	(ton/ha)
Bloco 3	1	1,5	140,1	-	228,0	4104	2222	4538,72	43,20	0,43
	2	1,5	140,9	0,4	205,0	3690	1427	4306,75	40,77	0,41
	3	1,5	143,6	0,4	224,0	4032	765	1163,85	10,81	0,11
	4	1,5	143,8	0,4	225,0	4050	1729	5447,17	50,51	0,51

Quadro 5.12 - Perda de sedimentos na rega realizada após a abertura dos sulcos.

5.4 Simulações da rega

5.4.1 Apresentação do modelo de simulação de rega "Sirmod"

Paralelamente à avaliação dos dados obtidos durante a realização dos ensaios de rega foi efectuada a simulação do processo de escoamento da água nos sulcos utilizando o programa SIRMOD (U.S.U.F., 1989). Este programa permite simular o escoamento da água nos sulcos utilizando o modelo hidrodinâmico completo, o modelo de inércia nula e o modelo da onda cinemática.

Para realizar as simulações o programa necessita: dos parâmetros da equação de infiltração, do declive, do comprimento do sulco, dos parâmetros da geometria do sulcos (altura de água no sulco, largura do sulco no topo e a meia altura e ρ_1 e ρ_2), rugosidade do sulco e da dotação a aplicar.

Para além das fases de avanço e de recessão a simulação inclui os volumes infiltrados por unidade de comprimento, ao longo do sulco , o "hidrograma" de excedentes, um balanço volumétrico resumido e uma análise das qualidades da rega simulada. Este programa permite também realizar simulações da utilização de técnicas de fornecimento de água à parcela como o "cut-back" e o "surge-flow".

Foi escolhido o modelo da onda cinemática para simular as regas, porque se adapta melhor às condições do escoamento nas situações em que o declive longitudinal é elevado. Este modelo permitiu simular sem problemas todas as regas realizadas ao contrário do modelo de inércia nula que não se adaptou a alguns conjuntos de dados. Foram utilizados os parâmetros das equação de infiltração calculados com programa ANREGA (Serralheiro, 1988). A partir dos parâmetros da geometria da secção transversal foram calculados os parâmetros empíricos, ρ_1 e ρ_2 que relacionam a área da secção tranversal e o raio hidráulico (Anexo 5).

No Anexo 11 são apresentados os resultados das simulações das regas.

Para avaliar o ajustamento das simulações aos casos semelhantes observados foram comparados os tempos de avanço e os volumes aplicado, infiltrado e final. Esta comparação é feita utilizando os valores do erro relativo médio,

$$ERM = \frac{1}{N}\sum^{N}\frac{t_0 - t_s}{t_0} \qquad (5.1)$$

e da média absoluta do erro relativo

$$MAE = \frac{1}{N}\sum^{N}\frac{|t_0 - t_s|}{t_0} \qquad (5.2)$$

sendo N o número de observações (número de ensaios realizados) e t_0 e t_s os tempos respectivamente observados e simulados. A MAE quantifica o afastamento total entre os valores observados e simulados e a ERM mostra se a simulação se faz por defeito ou por excesso.

		Tempo de avanço		
		1ª rega	2ª rega	3ª rega
ERM	Bloco 1	-0,295	-0,628	-0,326
	Bloco 2	-0,406	-1,396	-0,468
	Bloco 3	-0,747		-0,239
MAE	Bloco 1	0,326	0,776	0,326
	Bloco 2	0,450	1,396	0,468
	Bloco 3	0,747		0,243

Quadro 5.13 - Comparação entre os tempos de avanço observados e modelados com o programa SIRMOD.

No Quadro 5.14 são apresentados os resultados da comparação realizada entre os tempos de avanço observados e modelados pelo programa SIRMOD. Os valores de ERM mostram que no programa Sirmod o tempo de avanço calculado é sempre superior ao tempo de avanço real. As maiores diferenças registam-se no Bloco 2 onde as curvas de avanço são mais lineares. Os gráficos das Figuras 5.18 e 5.19 mostram como a linearidade do avanço afecta os resultados da simulação.

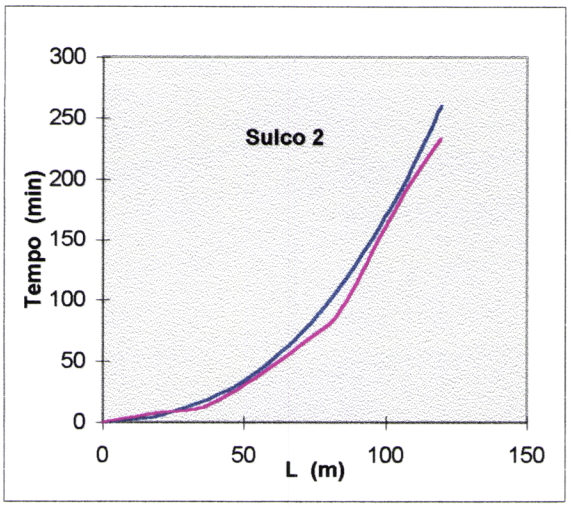


Figura 5.18 - Comparação entre o avanço simulado pelo programa SIRMOD (representada a azul) e a curva de avanço real (representada a rosa) na 2ª rega do Bloco 1.

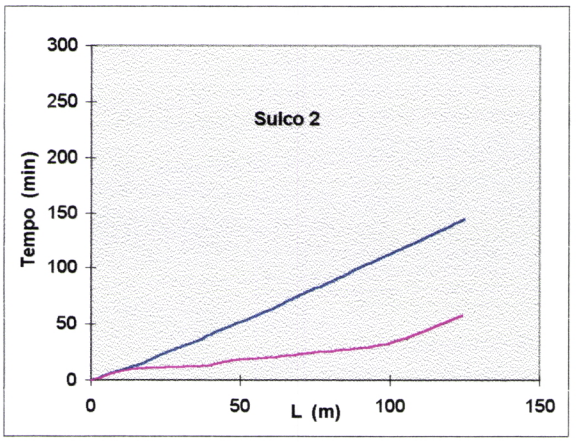


Figura 5.19 - Comparação entre o avanço simulado pelo programa SIRMOD (representada a azul) e a curva de avanço real (representada a rosa) na 2ª rega do Bloco 2.

No Quadro 5.14 são apresentados os resultados da comparação realizada entre os volumes aplicados, os volumes infiltrado e os volumes finais observados e modelados pelo programa SIRMOD. Esta comparação é feita utilizando os valores do erro relativo médio e da média absoluta do erro relativo calculados para os 3 volumes.

		1ª rega			2ª rega			3ª rega		
		Va	Vi	Vf	Va	Vi	Vf	Va	Vi	Vf
ERM	Bloco 1	0,01	-0,02	0,33	0,34	0,31	0,63	0,03	0,03	0,22
	Bloco 2	0,10	0,02	0,18	0,23	0,27	0,50	-0,01	0,08	-0,49
	Bloco 3	0,00	0,12	-2,25				-0,01	0,04	-1,18
MAE	Bloco 1	0,02	0,04	0,35	0,38	0,39	0,63	0,04	0,03	0,49
	Bloco 2	0,10	0,04	0,40	0,25	0,27	0,51	0,01	0,10	1,25
	Bloco 3	0,00	0,12	2,56				0,01	0,04	1,18

Quadro 5.14 - Comparação entre os volumes observados e modelados com o programa SIRMOD.

Os valores do Quadro 5.14 mostram que as maiores diferenças se verificam no volume final. As maiores diferenças entre os volumes acontecem durante a segunda rega e nos Blocos 1 e 2 onde os tempos de avanço simulados se afastam mais dos reais.

A observação dos resultados das simulações realizadas mostra que quando se fornecem ao programa valores de ρ_1 e ρ_2, calculados a partir dos parâmetros da equação do perímetro e da área molhados e se controla a duração da rega com os valores da dotação pretendida no fim do sulco, o tempo de aplicação definido pela simulação é igual ao tempo real. No entanto a fracção do tempo de aplicação prenchida pelo avanço não é correcta e é normalmente superior ao valor real. Esta diferença agrava-se nos casos em que o avanço é muito linear.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6. Conclusões e perspectivas futuras

6.1 Conclusões

Os declives elevados foram decisivos na erosividade da rega, mesmo quando se utilizam caudais calculados de acordo com as "normas" para determinação de caudais não erosivos. Apesar dos valores de perda de sedimentos não serem tão elevados como os referidos em alguma bibliografia, neste trabalho observou-se nítida erosão, que leva a desaconselhar este tipo de organização do terreno.

A análise dos resultados mostra que a perda de sedimentos no fim do sulco não é afectada pelo declive. As classes de declive não são relacionáveis estatísticamente com as alterações da erosão nos sulcos, o que em parte se deve à grande variação dos valores obtidos para a perda de sedimentos, entre os vários sulcos da mesma classe.

Os resultados mostram que a perda de sedimentos no fim do sulco sofre alterações com o número de regas realizadas.

É importante ter em conta que a erosão varia ao longo da época de rega e que um valor total de sedimentos perdidos não é suficiente para descrever o processo. É também necessário conhecer a sua evolução ao longo da época de rega. A erosão é particularmente importante na primeira rega, sendo nas regas seguintes muito atenuada pela formação de crosta.

Ficou claro que a especificidade das características da infiltração para cada sulco e para cada ensaio de rega dificultam o estudo da erosão.

O modelo de simulação utilizado não repoduz correctamente o avanço, calculando normalmente tempos de avanço mais elevados que os verificados durante a rega. Esta diferença agrava-se nos casos em que o avanço é muito linear. A simulação refere-se a todo o processo de rega, influenciado por vários factores do escoamento, nem sempre satisfatoriamente quantificados. A erosão actua também sobre esses factores, aumentando a dificuldade de os conhecer com rigor.

6.2 Perspectivas futuras

Este trabalho consistiu numa primeira aproximação ao estudo da erosão na rega por sulcos, contribuindo mais para levantar novas questões do que para fornecer respostas.

Parece essencial dedicar trabalhos futuros à avalição da influência das condições da superfície do solo na perda de sedimentos, estudando a aplicação de condicionadores e a utilização de diferentes técnicas de preparação do terreno.

Outro desafio importante consiste na caracterização do comportamento da erosão no decorrer da época de rega. Utilizando esta informação para optimizar técnicas de prevenção.

É também importante avaliar não só a quantidade de sedimentos que deixa o sulco mas também a movimentação dos sedimentos ao longo do sulco e a sua influência no potencial produtivo da parcela, na qualidade da rega e na eficiência da utilização dos recursos. Para isso contribui o estudo das relações entre as características do escoamento (velocidade e altura de água no sulco) e da rugosidade com a infiltração e a sua influência no processo de erosão.

Torna-se também necessário abordar a questão da qualidade da água que deixa os sulcos, uma vez que a carga acumulada durante o seu percurso não é constituída apenas por sedimentos. O arrastamento de nutrientes, resíduos de pesticidas e outros produtos químicos utilizados na agricultura pode constituir uma perda importante de recursos e uma ameaça à qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

É sobretudo importante alargar o estudo aos solos que representem as áreas beneficiadas pelo aproveitamento de Alqueva, de modo a adquirir conhecimentos que permitam decisões cientificamente fundamentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas

Aarstad, J. S., e D. E. Miller (1981) *Effects of Small Amounts of Residue on Furrow Erosion.* Soil Sci. Soc. Am. J., 45, 116-118.

Brown, M.J., W. D. Kemper, T. J. Trout e A. S. Humpherys (1988) *Sediment, Erosion and Water Intake in Furrows.* Irrigation Science, 9, 45-55.

Brown, M.J., D. L. Carter, G. A. Lehrsch e L. R. Sojka (1995) *Seasonal trends in furrow irrigation erosion in Southern Idaho.* Soil Technology, 8, 119-126.

Carrol, C., M. Halpin, K. Bell e J. Mollison (1995) *The Effect of Furrow Lenght on Rain and Irrigation-Induced Erosion on a Vertisol in Australia.* Aust. Journal of Soil Res., 33, 833-850.

Carter, D. L. (1993) *Furrow Irrigation Lowers Soil Productivity.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 119(6), 964-974.

Costa, J. B. (1985) *Caracterização e Constituição dos Solo. Lisboa* .Fundação Calouste Gulbenkian.

Elliot, R. L. e W. R. Walker, (1982) *Field Evaluaction of Furrow Infiltraction and Advance Functions:* Transactions of ASAE, 25(2), 396-400.

Elliot, R. L., W. R. Walker e G. V. Skogerboe (1983) *Infiltration Parameters from Furrow Irrigation Advance Data.* Transactions of ASAE, 26(6), 1726-1731.

Fangmeier, D. D., e M. K. Ramsey (1978) *Intake Characteristics of Irrigation Furrows.* Transactions of ASAE, 221(4), 696-700.

Hairsine, P. B., C. J. Moran e C. W. Rose (1992) *Recent Developments Regarding the Influence of Soil Surface Characteristics on Overland Flow and Erosion.* Aust. Journal of Soil Res, 30, 249-264.

Hamad, S. N., e G. E. Stringham (1978) *Maximum Nonerosive Furrow Irrigation Stream Size.* Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 104(IR3), 275-281.

Izadi, B., e W. W. Wallender (1985) *Furrow Hidraulic Characteristics and Infiltration.* Transactions of ASAE, 28(6), 1901-1908.

James, L. G. (1988) *Principles of farm irrigation system Design.* John Wiley & Sons, New York.

Katopodes, N. D., J. Tang e A. J. Clemens (1990) *Estimation of Surface Parameters.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 116(5), 676-695.

Kemper, W. D., T. J. Trout, M. J. Brown e R. C. Roseneau (1985) *Furrow Erosion and Soil Management.* Transactions of the ASAE, 28(5), 1564-1572.

Koluvek, P. K., K. K. Tanji e T. J. Trouth (1993) *Overview of Soil Erosion and Irrigation.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 119(6), 929-945.

Lehrsch, G. A., e M.J. Brown (1995) *Furrow Erosion and Aggregate Stability Variation in a Portneuf Silt Loam.* Soil Technology, 7, 327-341.

Meyer, I. D., e W.C. Harmon (1984) *Sediment Losses from Cropland Furrows of Different Gradients*, Transaction of ASAE, 448-453.[C14]

Meyer, I. D., B. A. Zuhdi, N. L. Coleman e S. N. Prasad (1983) *Transport of Sand-Sized Sediment Along Crop-Row Furrows.* Transactions of the ASAE, 26, 101-111.

Morgan, R. P. C. (1986) *Soil Erosion and Conservation.* Longmans Cientific & Technical, England.

Scaloppi, E. J., G. P. Merkley e L. S. Willardson (1995) *Intake Parameters from Advance and Wetting Phases of Surface Irrigation.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 121(1), 57-70.

Serralheiro, R. P. (1988) *Um estudo da rega por sulcos num solo argiluviado.* Tese apresentada na Universidade de Évora para obtenção do grau de Doutor, Évora.

Serralheiro, R. P. (1995) *Furrow Irrigation Advance and Infiltration Equations for a Mediterranean Soil.* J. agric. Engng. Res., 62, 117-126.

Serralheiro, R. P. (1996) *Modernização e desenvolvimento da rega de superfície.* Publicações "Universidade de Évora",série "Ciências Agrárias, nº 2, Évora.

Serralheiro, R. P., e M. R. Oliveira (1994) *Furrow Irrigation on Subsoiled Brown Mediterranean Soil: Water Balance and Root Growth.* Relatório nº 94-A-022 apresentado a AGENG'94, Milano.

Strelkoff, T., e F. Souza (1984) *Modelling Effect of Depth on Furrow Infiltration.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering,10, 375-387.

Trout, T. J. (1991) *Furrow Geometric Parameters.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(5), 613-633.

Trout, T. J. (1992) *Flow Velocity and Wetted Perimeter Effects on Furrow Infiltration.* Transactions of ASAE, 35(3), 855-862.

Trout, J., e W. H. Neibling (1993) *Erosion and Sedimentation Processes on Irrigation Fields.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 119(6), 947-963.

Utah State University Foundation (1989) *SIRMOD - The Surface Irrigation Simulation Model, user 's guide.* Logan, Utah State University.

ANEXOS

Anexo 1. Ficheiro de armazenamento das coordenadas dos pontos digitalizados que constitui o ficheiro de entrada do programa DIGITEQ

s1p11

1	542	1560
2	1460	1050
3	1551	948
4	1631	846
5	1708	746
6	1780	650
7	1857	549
8	1948	449
9	2099	350
10	2391	246
11	2923	199
12	3421	244
13	3599	343
14	3691	444
15	3778	539
16	3879	639
17	4007	737
18	4169	837
19	4381	938
20	4592	1035
21	5543	1539
22	543	1559

Anexo 2. Ficheiro de armazenamento do programa DIGITEQ

b1a1r
9.5.1996
11

.4671454131603241	10.5091552734375	2.444921731948853
1.492564678192139	15.72914028167725	15.62748908996582
2.511359214782715	18.95251655578613	32.41597747802734
3.50148868560791	21.63569831848145	50.85026550292969
4.523499011993408	24.37080001831055	71.72698211669922
5.506478786468506	27.22860336303711	93.69441986083984
6.522747993469238	30.44597053527832	118.6727142333984
7.55654239654541	34.14983367919922	146.87109375
8.577828407287598	37.89903259277344	177.8109436035156
13.73079109191895	59.50931930541992	390.7655029296875

Anexo 3. Exemplo de cálculo das equações que caracterizam a área e o perímetro molhados apresentados pelo programa DIGITEQ

s1p11 b1a1r 09-05-96

Y	Pm	Am	
	cm	cm	cm2
1	0.5	10.5	2.4
2	1.5	15.7	15.6
3	2.5	19.0	32.4
4	3.5	21.6	50.9
5	4.5	24.4	71.7
6	5.5	27.2	93.7
7	6.5	30.4	118.7
8	7.6	34.1	146.9
9	8.6	37.9	177.8
10	13.7	59.5	390.8

Quer equações S/N ?

Quantos destes pontos entram na regressão ?

Equações:

Pm= 13.5310001373291 * y ^ .4300000071525574 r2 = 0.975

Am= 8.003999710083008 * y ^ 1.452999949455261 r2 = 0.999

Anexo 4. Valores dos parâmetros das equações da área e do perímetro molhado, nas formas: $P_m = P_0 \cdot y^{R_0}$ e $A_m = \sigma_1 \cdot y^{\sigma_2}$

Anexo 4.1 Secção localizada a meio do sulco

Bloco 1		Perfil	Perímetro		Área	
			Po	Ro	σ1	σ2
Antes da 1ª rega	s1	p3	12,424	0,570	7,080	1,577
	s2	p3	11,910	0,586	6,743	1,586
	s3	p7	14,565	0,481	8,373	1,529
	s4	p5	17,736	0,418	10,354	1,487
Depois da 1º rega	s1	p6	14,051	0,452	8,215	1,485
	s2	p6	11,144	0,625	5,893	1,693
	s3	p7	14,703	0,497	8,379	1,547
	s4	p5	18,510	0,403	10,857	1,474
Depois da 2ª rega	s1	p6	14,545	0,437	8,562	1,472
	s2	p6	9,776	0,691	5,026	1,764
	s3	p6	16,105	0,471	9,244	1,530
	s4	p5	18,262	0,417	10,759	1,476
Depois da 3º rega	s1	p6	11,661	0,56	6,459	1,593
	s2	p6	12,967	0,54	7,197	1,598
	s3	p6	12,816	0,578	6,989	1,636
	s4	p5	13,881	0,556	7,610	1,623
Bloco 2		perfil	Po	Ro	σ1	σ2
Antes da 1ª rega	s1	p7	11,302	0,537	6,405	1,559
	s2	p7	11,018	0,580	5,973	1,648
	s3	p7	13,725	0,517	7,628	1,580
	s4	p7	13,392	0,504	7,603	1,548
Depois da 1º rega	s1	p7	10,932	0,579	5,980	1,618
	s2	p7	9,501	0,634	5,106	1,654
	s3	p7	14,693	0,453	8,473	1,508
	s4	p7	10,321	0,640	5,634	1,653
Depois da 2ª rega	s1	p7	13,749	0,458	7,993	1,495
	s2	p7	11,115	0,582	6,086	1,619
	s3	p7	17,489	0,385	10,319	1,450
	s4	p7	-	-	-	-
Depois da 3º rega	s1	p7	16,023	0,383	9,634	1,412
	s2	p7	12,717	0,536	7,163	1,570
	s3	p7	15,59	0,482	8,748	1,552
	s4	p7	17,232	0,409	10,244	1,458
Bloco 3		perfil	Po	Ro	σ1	σ2
Antes da 1ª rega	s1	p7	12,846	0,490	7,440	1,513
	s2	p7	19,573	0,501	10,909	1,540
	s3	p7	14,648	0,487	8,358	1,540
	s4	p7	13,964	0,515	8,007	1,547
Depois da 1º rega	s1	p7	11,812	0,541	6,659	1,561
	s2	p7	16,871	0,404	10,157	1,438
	s3	p7	13,746	0,494	7,681	1,562
	s4	p7	14,028	0,479	8,111	1,516
Depois da 2ª rega	s1	p7	11,693	0,555	6,523	1,588
	s2	p7	17,519	0,386	10,634	1,421
	s3	p7	18,115	0,347	10,966	1,404
	s4	p7	16,013	0,455	9,360	1,495
Depois da 3º rega	s1	p7	11,578	0,552	6,488	1,580
	s2	p7	16,163	0,433	9,518	1,480
	s3	p7	13,981	0,496	7,958	1,545
	s4	p7	14,376	0,521	8,085	1,578

Anexo 4.2 Secção localizada no fim do sulco

Bloco 1		*perfil*	*Po*	*Ro*	*σ1*	*σ2*
	s1	p12	17,902	0,4	10,654	1,450
Antes da	s2	p12	22,304	0,356	13,588	1,419
1ª rega	s3	p12	11,893	0,51	6,625	1,560
	s4	p11	19,756	0,41	11,427	1,500
	s1	p12	19,46	0,486	9,714	1,644
Depois da	s2	p12	25,516	0,31	16,025	1,370
1º rega	s3	p12	14,201	0,436	8,119	1,492
	s4	p11	21,475	0,368	12,781	1,452
	s1	p12	17,265	0,562	9,331	1,583
Depois da	s2	p12	25,16	0,305	15,885	1,389
2ª rega	s3	p13	14,878	0,393	8,789	1,439
	s4	p11	14,928	0,54	8,235	1,610
	s1	p12	16,972	0,479	9,835	1,529
Depois da	s2	p12	20,31	0,397	12,758	1,448
3º rega	s3	p12	12,745	0,473	7,233	1,524
	s4	p11	16,596	0,49	9,283	1,571
Bloco 2		perfil	*Po*	*Ro*	*σ1*	*σ2*
	s1	p13	11,248	0,649	6,315	1,633
Antes da	s2	p13	10,938	0,643	6,156	1,624
1ª rega	s3	p11	8,906	0,653	4,780	1,666
	s4	p13	9,27	0,676	5,041	1,671
	s1	p13	10,455	0,711	5,781	1,683
Depois da	s2	p13	10,166	0,715	5,606	1,669
1º rega	s3	p13	7,256	0,702	3,945	1,650
	s4	p13	10,321	0,64	5,640	1,653
	s1	p13	10,438	0,669	5,726	1,666
Depois da	s2	p13	10,513	0,58	5,878	1,590
2ª rega	s3	p13	11,46	0,55	7,391	1,465
	s4	p13	10,417	0,615	5,800	1,615
	s1	p13	8,451	0,8	4,402	1,786
Depois da	s2	p13	10,622	0,599	5,947	1,601
3º rega	s3	p13	10,707	0,621	6,254	1,560
	s4	p13	9,83	0,639	5,405	1,641
Bloco 2		perfil	*Po*	*Ro*	*σ1*	*σ2*
	s1	p13	13,033	0,514	7,343	1,560
Antes da	s2	p13	16,683	0,452	9,585	1,520
1ª rega	s3	p14	10,696	0,672	5,927	1,658
	s4	p14	8,789	0,702	4,735	1,690
	s1	p14	11,27	0,595	6,284	1,609
Depois da	s2	p14	13,147	0,574	7,396	1,600
1º rega	s3	p14	13,465	0,515	7,634	1,558
	s4	p14	10,644	0,572	5,876	1,599
	s1	p14	10,589	0,639	5,773	1,656
Depois da	s2	p14	8,645	0,753	4,390	1,787
2ª rega	s3	p14	12,58	0,54	7,085	1,574
	s4	p14	12,567	0,479	7,249	1,505
	s1	p14	9,573	0,655	5,190	1,663
Depois da	s2	p14	12,047	0,544	6,877	1,557
3º rega	s3	p14	12,803	0,546	7,199	1,582
	s4	p14	11,939	0,507	6,766	1,538

Anexo 5. *Cálculo dos parâmetros da equação $A^2 \cdot R^{4/3} = \rho_1 \cdot A^{\rho 2}$, utilizada no programa SIRMOD para relacionar a área da secção transversal com o raio hidráulico.*

Registo	Sulco	Perfil	Perimetro		Área		Parâmetros do Sirmod	
			Po	R0	σ1	σ2	ρ1	ρ2
Bloco 1 1ª rega	sulco 1	p3	12,424	0,570	7,080	1,577	1,021	1,606
	sulco 2	p3	11,910	0,586	6,743	1,586	0,927	1,642
	sulco 3	p7	14,565	0,481	8,373	1,529	1,717	1,398
	sulco 4	p5	17,736	0,418	10,354	1,487	2,821	1,249
Bloco 1 2ª rega	sulco 1	p6	14,051	0,452	8,215	1,485	1,910	1,353
	sulco 2	p6	11,144	0,625	5,893	1,693	0,809	1,641
	sulco 3	p7	14,703	0,497	8,379	1,547	1,594	1,428
	sulco 4	p5	18,510	0,403	10,857	1,474	3,191	1,215
Bloco 1 3ª rega	sulco 1	p6	14,545	0,437	8,562	1,472	2,127	1,319
	sulco 2	p6	9,776	0,691	5,026	1,764	0,626	1,741
	sulco 3	p6	16,105	0,471	9,244	1,530	1,944	1,368
	sulco 4	p5	18,262	0,417	10,759	1,476	2,895	1,256
Bloco 2 1ª rega	sulco 1	p7	11,302	0,537	6,405	1,559	1,121	1,531
	sulco 2	p7	11,018	0,580	5,973	1,648	0,963	1,564
	sulco 3	p7	13,725	0,517	7,628	1,580	1,385	1,454
	sulco 4	p7	13,392	0,504	7,603	1,548	1,443	1,447
Bloco 2 2ª rega	sulco 1	p7	10,932	0,579	5,980	1,618	0,931	1,590
	sulco 2	p7	9,501	0,634	5,106	1,654	0,708	1,704
	sulco 3	p7	14,693	0,453	8,473	1,508	1,987	1,335
	sulco 4	p7	10,321	0,640	5,634	1,653	0,723	1,721
Bloco 2 3ª rega	sulco 1	p7	13,749	0,458	7,993	1,495	1,829	1,362
	sulco 2	p7	11,115	0,582	6,086	1,619	0,926	1,598
	sulco 3	p7	17,489	0,385	10,319	1,450	3,354	1,180
	sulco 4	p7	-	-	-	-	-	-
Bloco 3 1ª rega	sulco 1	p7	12,846	0,490	7,440	1,513	1,487	1,439
	sulco 2	p7	19,573	0,501	10,909	1,540	1,724	1,446
	sulco 3	p7	14,648	0,487	8,358	1,540	1,672	1,405
	sulco 4	p7	13,964	0,515	8,007	1,547	1,407	1,480
Bloco 3 2ª rega	sulco 1	p7	11,812	0,541	6,659	1,561	1,113	1,540
	sulco 2	p7	16,871	0,404	10,157	1,438	2,901	1,249
	sulco 3	p7	13,746	0,494	7,681	1,562	1,546	1,406
	sulco 4	p7	14,028	0,479	8,111	1,516	1,676	1,404
Bloco 3 3ª rega	sulco 1	p7	11,693	0,555	6,523	1,588	1,061	1,553
	sulco 2	p7	17,519	0,386	10,634	1,421	3,348	1,207
	sulco 3	p7	18,115	0,347	10,966	1,404	4,436	1,098
	sulco 4	p7	16,013	0,455	9,360	1,495	2,079	1,353

Anexo 6. Cálculo da largura da secção tranversal para $y_{ma'ximo}$ e para $y_{ma'ximo}/2$

Registo	Sulco	Perfil	P_m (cm)	y_{max} (cm)	B estimado (m)	B calculado (m)	$P_m/2$ (cm)	$y_{max}/2$ (cm)	B/2 estimado (m)	B/2 calculado (m)
Bloco 1 1ª rega	sulco 1	p3	12,424	1	0,124	0,124	8,369	0,5	0,084	0,084
	sulco 2	p3	13,889	1,3	0,139	0,139	9,253	0,65	0,093	0,093
	sulco 3	p7	13,083	0,8	0,131	0,131	9,373	0,4	0,094	0,094
	sulco 4	p5	16,157	0,8	0,162	0,162	12,093	0,4	0,121	0,121
Bloco 1 2ª rega	sulco 1	p6	9,286	0,4	0,093	0,093	6,788	0,2	0,068	0,068
	sulco 2	p6	10,434	0,9	0,104	0,104	6,765	0,45	0,068	0,068
	sulco 3	p7	9,325	0,4	0,093	0,093	6,607	0,2	0,066	0,066
	sulco 4	p5	12,795	0,4	0,128	0,128	9,677	0,2	0,097	0,097
Bloco 1 3ª rega	sulco 1	p6	14,545	1	0,145	0,145	10,744	0,5	0,107	0,107
	sulco 2	p6	12,335	1,4	0,123	0,123	7,641	0,7	0,076	0,076
	sulco 3	p6	18,223	1,3	0,182	0,182	13,147	0,65	0,131	0,131
	sulco 4	p5	13,678	0,5	0,137	0,137	10,244	0,25	0,102	0,102
Bloco 2 1ª rega	sulco 1	p7	10,680	0,9	0,107	0,107	7,361	0,45	0,074	0,074
	sulco 2	p7	16,943	2,1	0,169	0,169	11,334	1,05	0,113	0,113
	sulco 3	p7	16,926	1,5	0,169	0,169	11,828	0,75	0,118	0,118
	sulco 4	p7	16,428	1,5	0,164	0,164	11,584	0,75	0,116	0,116
Bloco 2 2ª rega	sulco 1	p7	12,725	1,3	0,127	0,127	8,519	0,65	0,085	0,085
	sulco 2	p7	11,760	1,4	0,118	0,118	7,578	0,7	0,076	0,076
	sulco 3	p7	19,176	1,8	0,192	0,192	14,008	0,9	0,14	0,140
	sulco 4	p7	12,801	1,4	0,128	0,128	8,215	0,7	0,082	0,082
Bloco 2 3ª rega	sulco 1	p7	16,555	1,5	0,165	0,165	12,052	0,75	0,12	0,120
	sulco 2	p7	13,519	1,4	0,135	0,135	9,031	0,7	0,09	0,090
	sulco 3	p7	19,908	1,4	0,199	0,199	15,245	0,7	0,152	0,152
	sulco 4	p7	-	-	-	-	-	-	-	-
Bloco 3 1ª rega	sulco 1	p7	25,338	4	0,252	0,252	18,041	2	0,18	0,180
	sulco 2	p7	39,200	4	0,390	0,390	27,700	2	0,227	0,277
	sulco 3	p7	13,915	0,9	0,139	0,139	9,929	0,45	0,099	0,099
	sulco 4	p7	17,207	1,5	0,172	0,172	12,041	0,75	0,12	0,120
Bloco 3 2ª rega	sulco 1	p7	14,709	1,5	0,147	0,147	10,110	0,75	0,101	0,101
	sulco 2	p7	20,905	1,7	0,209	0,209	15,799	0,85	0,158	0,158
	sulco 3	p7	17,866	1,7	0,179	0,179	12,686	0,85	0,127	0,127
	sulco 4	p7	18,088	1,7	0,181	0,181	12,977	0,85	0,13	0,130
Bloco 3 3ª rega	sulco 1	p7	14,644	1,5	0,146	0,146	9,967	0,75	0,1	0,100
	sulco 2	p7	20,487	1,5	0,205	0,205	15,678	0,75	0,157	0,157
	sulco 3	p7	20,852	1,5	0,208	0,208	16,394	0,75	0,164	0,164
	sulco 4	p7	15,263	0,9	0,153	0,153	11,135	0,45	0,111	0,111

Anexo 7. Ficheiro de saída do Programa ANREGA (exemplo)

**** ANREGA ****
R.P.SERRALHEIRO, UNIVERSIDADE DE ÉVORA, 1989

Avaliação da rega sulco 1 27/9/95 Faile de dados: B1R3

```
1        sulco 1     27/9/95     o
.023      10          12        .04        .75
.21       10          .2        18         891
14.545     .437       8.562      1.472
17.265     .562       9.331      1.583
14  14.09  14.17  14.23  14.35  14.44  14.58  15.08  15.18  15.27  15.46
0  0  0
18.34  18.37  18.38  18.39  18.4  18.42  18.43  18.44  18.45  18.46  18.47
0  0  0
```

DETERMIN. DA EQ. INF. POR ELLIOTT E WALKER (1982) ESTENDIDO
Teste por verificação do balanço volumétrico

S0 = .023 Q0 = .21 l/s w= .75 m
Parametros da eq. avanço: p = 2.400 r = .843

PN= 20 Pm0= 15 Pm1= 24 (cm)
AN= 15 A0= 9 A1= 24 AM= 11 (cm2)

LEWIS 5.577 0.133 0.010
KOSTIAKOV 5.142 0.169
PHILIP 2.657 0.500 -0.160
Tempo de aplicação ta= 274 min Va= 3452 litros

Eq. da Infilt.: k= 5.142 a= 0.169 if= .000 KOSTIAKOV

Comprimento (m)	Tempos (minutos) Avanço	Recessão	Infiltr.	Z (l/m)
0	0	274	274	13
12	9	277	268	13
24	17	278	261	13
36	23	279	256	13
48	35	280	245	13
60	44	282	238	13
72	58	283	225	13
84	68	284	216	13
96	78	285	207	13
108	87	286	199	13
120	106	287	181	12

Dotação pretendida: 12 l/m ta= 274 min Va= 3452 litros
Tempo útil de infiltração: 150 min
Verificação do balanço volumétrico:
Vols.medidos Va = 3452 l Vf= 891 l
Vi obs.= 2561 Vi calc.= 1550 Erro=-1011 = -39 %

Eq. da Infilt.: k= 8.496 a= 0.169 if= .000 KOSTIAKOV

Comprimento (m)	Tempos (minutos) Avanço	Recessão	Infiltr.	Z (l/m)
0	0	274	274	22
12	9	277	268	22
24	17	278	261	22
36	23	279	256	22
48	35	280	245	22
60	44	282	238	21
72	58	283	225	21
84	68	284	216	21
96	78	285	207	21
108	87	286	199	21
120	106	287	181	20

Dotação pretendida: 20 l/m ta= 274 min Va= 3452 litros
Tempo útil de infiltração: 158 min

Verificação do balanço volumétrico:

Vols.medidos Va = 3452 l Vf= 891 l
Vi obs.= 2561 Vi calc.= 2562 Erro= 1 = 0 %

Avaliação da rega p/ D = 20 l/m

Qualidades verificadas:

L= 120 m; Vu = 2400 l; Vf= 891 l; Vp= 161 l
C. unif. Christ.= .94 Eficiências: ei = .94 ea = .7

Potenciais, sem cut-back:

L	Ta	Volumes, litros					C.unif.	Efics.	
m	min	Va	Vu	Vi	Vf	Vp	Christ.	ei	ea
120	251	3163	2400	2517	646	117	.98	.95	.76

Opção cut-back:

L (m)	Q0 (l/s)	ta (min)	Qr1 (l/s)	tb (min)	Qr2 (l/s)	tc (min)	Va (l)	ea
120	.21	106	.14	154	.05	251	2019	1.19

Extrapolação para comprimentos de 60 m a 180 m

Potenciais, sem cut-back:

L	Ta	Volumes, litros					C.unif.	Efics.	
m	min	Va	Vu	Vi	Vf	Vp	Christ.	ei	ea
60	194	2444	1200	1223	1221	23	.99	.98	.49
72	207	2608	1440	1479	1129	39	.99	.97	.55
84	216	2722	1680	1732	990	52	.99	.97	.62
96	225	2835	1920	1987	848	67	.98	.97	.68
108	233	2936	2160	2241	695	81	.98	.96	.74
120	251	3163	2400	2517	646	117	.98	.95	.76
132	260	3276	2640	2776	500	136	.98	.95	.81
144	272	3427	2880	3043	384	163	.98	.95	.84
156	284	3578	3120	3312	266	192	.98	.94	.87
168	296	3730	3360	3583	147	223	.97	.94	.9
180	308	3881	3600	3856	25	256	.97	.93	.93

Anexo 8. Avaliação regas utilizando o programa ANREGA

Anexo 8.1 Avaliação da 1ª rega

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal l/s	Tempo de Aplicação	Anrega					
						Volumes			Qualidade da rega		
						Va	Vi	Vf	ea	ei	C.U.C.
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,16	239	2294	1902	392	0,73	0,88	0,91
	2	2,4	119,5	0,23	256	3533	2796	737	0,62	0,79	0,91
	3	2,3	117,1	0,31	277	5152	4731	421	0,23	0,25	0,74
	4	2,3	115,1	0,3	242	4356	3776	580	0,71	0,82	0,94
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,39	255	5967	5731	236	0,88	0,92	0,93
	2	1,2	124,8	0,36	230	4968	3310	1658	0,63	0,94	0,94
	3	1,2	126,2	0,47	206	5809	3790	2019	0,64	0,98	0,95
	4	1,2	127,3	0,48	278	8006	7532	474	0,50	0,54	0,86
Bloco 3	1	1,5	140,1	0,44	270	7128	7005	123	0,78	0,79	0,90
	2	1,5	140,9	0,41	270	6642	6526	116	0,90	0,92	0,93
	3	1,5	143,6	0,47	302	8516	8442	74	0,69	0,69	0,87
	4	1,5	143,8	0,48	312	8986	8900	86	0,70	0,71	0,85

Anexo 8.2 Avaliação da 2ª rega

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal l/s	Tempo de Aplicação	Anrega					
						Volumes			Qualidade da rega		
						Va	Vi	Vf	ea	ei	C.U.C.
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,23	349	4816	4245	571	0,55	0,65	0,85
	2	2,4	119,5	0,28	349	5863	5230	633	0,56	0,63	0,86
	3	2,3	117,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	2,3	115,1	0,26	368	5741	5150	591	0,52	0,58	0,86
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,47	181	5104	4221	883	0,82	1,00	0,95
	2	1,2	124,8	0,35	203	4263	3226	1037	0,73	0,97	0,95
	3	1,2	126,2	0,39	180	4212	848	3364	0,20	0,99	0,95
	4	1,2	127,3	0,5	202	6060	5551	509	0,61	0,67	0,89
Bloco 3	1	1,5	140,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	1,5	140,9	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	1,5	143,6	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	1,5	143,8	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo 8.3 Avaliação da 3ª rega

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal l/s	Tempo de Aplicação	Anrega					
						Volumes			Qualidade da rega		
						Va	Vi	Vf	ea	ei	C.U.C.
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,21	274	3452	2562	891	0,70	0,94	0,94
	2	2,4	119,5	0,28	330	5544	5407	137	0,62	0,63	0,88
	3	2,3	117,1	0,24	330	4752	4485	267	0,66	0,70	0,89
	4	2,3	115,1	0,24	309	4450	3884	566	0,72	0,82	0,91
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,31	262	4873	4773	100	0,86	0,88	0,93
	2	1,2	124,8	0,37	303	6727	6595	132	0,46	0,47	0,83
	3	1,2	126,2	0,26	268	4181	3299	882	0,66	0,84	0,92
	4	1,2	127,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Bloco 3	1	1,5	140,1	0,45	322	8694	8681	13	0,28	0,28	0,73
	2	1,5	140,9	0,52	244	7613	7053	560	0,81	0,87	0,92
	3	1,5	143,6	0,59	323	11434	11278	156	0,67	0,68	0,83
	4	1,51	143,8	0,42	294	7409	6780	629	0,73	0,80	0,81

Anexo 9. Concentração de sedimentos nas amostras de água recolhidas no fim do sulco, (mg/l)

Anexo 9.1 Bloco1

Regas	Sulcos	Ordem de amostagem					
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
1ª rega	Sulco 1	5389	2517	2300	1295	1180	
	Sulco 2	1103	1648	1267	958	874	
	Sulco 3	5469					
	Sulco 4	2835	982	1119	965	793	
2ª rega	Sulco 1	1165	598	295	95	95	
	Sulco 2	454	236	219	376	279	
	Sulco 4	604	235	128	229	189	
3ª rega	Sulco 1	3426	3208	2129	2338	142	1264
	Sulco 2	858	724				
	Sulco 3	305	295	665	1411		
	Sulco 4	822	1392	866	1014	1572	0

Anexo 9.2 Bloco 2

Regas	Sulcos	Ordem de amostagem				
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
1ª rega	Sulco 1	2942	717	478	373	363
	Sulco 2	833	856	418	340	262
	Sulco 3	2295	1810	1380	1107	1272
	Sulco 4	7372	1353	983	1425	3461
2ª rega	Sulco 1	1637	931	1028	742	587
	Sulco 2	824	753	491	565	
	Sulco 3	2018	3165	2038	1346	2095
	Sulco 4	1705	890	2247	1705	2116
3ª rega	Sulco 1	271	182	117	97	121
	Sulco 2	80	126			
	Sulco 3	199	188	160	139	193
	Sulco 4					

Anexo 9.3 Bloco 3

Regas	Sulcos	Ordem de amostagem						
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
1ª rega	Sulco 1	6604	643	463	361	700		
	Sulco 2	2962	2376	5010	4484	496		
	Sulco 3	1197	405	540	530	218		
	Sulco 4	3334	911	939	551	440		
2ª rega	Sulco 1	1029	1361	975	1270	732		
	Sulco 2	6012	1850	1177	989	1211	1039	1089
	Sulco 4	1047	1043	1553	1407	1481		
3ª rega	Sulco 1	1396						
	Sulco 2	650	462	477	324	283		
	Sulco 3	141	407	750				
	Sulco 4	2348	506	419	335	372		

Anexo 10. Ficheiro de saída do programa SIRMOD (exemplo)

********** KINEMATIC-WAVE MODEL **********

B2R2S1

QIN= 0.0004 M**3/SEC
S01= 0.12E-01 MANNING N= 0.04, L= 124.1 M
K= 0.152E-01 M**3/M/MIN**A
A= 0.169
F0= 0.000E+00
DT= 5.00 MIN TCO= 181.00 MIN PHI= 0.51 THETA= 0.60
ZREQ= 0.0350 M**3/M AT END OF FIELD

HYDRAULIC SECTION PARAMETERS
RHO1=0.9310 RHO2= 1.5900 WHERE A**2 R**1.33 = RHO1*A**RHO2
CCH= 1.5718 CMH= 0.5793 WHERE T = CCH*Y**CMH
GAM1= 1.7220 GAM2= 0.3762 WHERE WP = GAM1 * A **GAM2
SIGMA1= 1.0015 SIGMA2= 1.5809 WHERE A = SIGMA1*Y**SIGMA2

DOWNSTREAM BOUNDARY CONDITION IS:
Qro= 2.6424 * Aro** 0.7950

CONTINUOUS FLOW ADVANCE-RECESSION TRAJECTORY

NODE	XA M	TA MIN	TR MIN	Z M**3/M	TZ M**3/M
0	0.0	0.0	186.0	0.367E-01	0.367E-01
1	10.8	10.0	185.0	0.363E-01	0.363E-01
2	16.7	15.0	185.0	0.361E-01	0.361E-01
3	20.0	20.0	185.0	0.360E-01	0.360E-01
4	28.4	30.0	185.0	0.356E-01	0.356E-01
5	36.4	40.0	185.0	0.352E-01	0.352E-01
6	41.2	45.0	185.0	0.350E-01	0.350E-01
7	48.6	55.0	185.0	0.345E-01	0.345E-01
8	55.8	65.0	185.0	0.341E-01	0.341E-01
9	58.6	70.0	185.0	0.338E-01	0.338E-01
10	65.6	80.0	185.0	0.333E-01	0.333E-01
11	72.5	90.0	185.0	0.327E-01	0.327E-01
12	79.2	100.0	185.0	0.321E-01	0.321E-01
13	85.8	110.0	185.0	0.315E-01	0.315E-01
14	92.3	120.0	185.0	0.307E-01	0.307E-01
15	98.7	130.0	185.0	0.299E-01	0.299E-01
16	105.1	140.0	185.0	0.289E-01	0.289E-01
17	111.3	150.0	185.0	0.277E-01	0.277E-01
18	117.5	160.0	185.0	0.261E-01	0.261E-01
19	121.0	165.0	185.0	0.252E-01	0.252E-01
20	123.6	170.0	185.0	0.240E-01	0.240E-01
21	124.1	170.7	185.0	0.238E-01	0.238E-01

FIELD TAILWATER HYDROGRAPHS

ELAPSED TIME (MIN)	TAILWATER FLOW (M**3/SEC)	CUMULATIVE TAILWATER (M**3)
175.0	0.129E-03	0.039
180.0	0.232E-03	0.108
185.0	0.142E-03	0.151

VOLUME BALANCE
TOTAL INFLOW= 4.44 M**3
TOTAL INFILT= 4.059 M**3
TOTAL RUNOFF= 0.151 M**3
ERROR = 5.17 PERCENT

UNIFORMITY-EFFICIENCY ANALYSIS
APPLICATION EFFICIENCY = 90.6 PERCENT
STORAGE EFFICIENCY = 92.6 PERCENT
DISTRIBUTION UNIFORMITY= 85.2 PERCENT
ABS. DIST. UNIFORMITY = 73.0 PERCENT

Anexo 11. Resultados das simulações realizadas com o programa SiRMOD

Anexo 11.1 Resultados das simulações realizadas para da 1º rega

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal l/s	Tempo de Aplicação	Sirmod							
						Volumes			Qalidades da rega				
						Va	Vl	Vf	Ea	Earm	Ed	Ud	Erro
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,16	239	2,30	1,851	0,411	71,7%	98,9%	86,7%	78,2%	1,80%
	2	2,4	119,5	0,23	256	3,52	3,020	0,516	67,8%	99,9%	85,2%	75,6%	0,49%
	3	2,3	117,1	0,31	277	4,84	4,831	0,030	24,2%	100,0%	65,4%	37,1%	0,73%
	4	2,3	115,1	0,3	242	4,41	3,833	0,509	72,4%	99,1%	83,3%	72,7%	1,55%
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,39	255	5,97	5,488	0,339	87,6%	95,8%	84,5%	72,7%	2,34%
	2	1,2	124,8	0,36	230	4,75	3,314	1,436	67,4%	98,7%	93,1%	89,8%	0,05%
	3	1,2	126,2	0,47	206	4,23	3,907	0,441	92,0%	99,5%	98,5%	97,60%	2,80%
	4	1,2	127,3	0,48	278	7,34	7,035	0,356	53,7%	100,0%	75,9%	58,1%	0,63%
Bloco 3	1	1,5	140,1	0,44	270	7,13	5,863	0,345	68,1%	93,6%	66,7%	48,8%	12,91%
	2	1,5	140,9	0,41	270	6,64	4,913	0,043	70,5%	83,1%	56,3%	23,1%	25,38%
	3	1,5	143,6	0,47	302	8,60	8,064	0,433	64,9%	99,6%	79,6%	59,5%	1,33%
	4	1,5	143,8	0,48	312	9,07	8,616	0,340	65,9%	99,0%	75,4%	53,1%	1,28%

Anexo 11.2 Resultados das simulações realizadas para da 2º rega

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal l/s	Tempo de Aplicação	Sirmod							
						Volumes			Qalidades da rega				
						Va	Vl	Vf	Ea	Earm	Ed	Ud	Erro
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,23	349	4,28	3,985	0,305	61,4%	100,0%	80,1%	63,6%	0,29%
	2	2,4	119,5	0,28	349	6,22	5,871	0,363	57,7%	100,0%	76,6%	59,3%	0,29%
	3	2,3	117,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	2,3	115,1	0,26	368	0,16	0,050	0,000	-	-	-	-	68,14%
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,47	181	5,22	4,089	0,903	78,3%	94,0%	91,6%	86,9%	4,30%
	2	1,2	124,8	0,35	203	4,20	3,120	0,950	75,8%	98,1%	94,9%	92,2%	0,74%
	3	1,2	126,2	0,39	180	0,23	0,069	0,000					70,59%
	4	1,2	127,3	0,5	202	6,15	4,974	0,037	57,7%	91,5%	52,7%	21,7%	18,52%
Bloco 3	1	1,5	140,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	1,5	140,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	1,5	143,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	1,5	143,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo 11.3 Resultados das simulações realizadas para da 3º rega

	Sulco nº	Declive (%)	Comprim. do sulco (m)	Caudal l/s	Tempo de Aplicação	Sirmod							
						Volumes			Qalidades da rega				
						Va	Vl	Vf	Ea	Earm	Ed	Ud	Erro
Bloco 1	1	2,3	119,4	0,21	274	3,020	2,417	60,7%	77,6%	98,3%	92,8%	88,80%	0,01%
	2	2,4	119,5	0,28	330	5,540	5,328	0,0%	-	-	-	-	3,90%
	3	2,3	117,1	0,24	330	4,680	4,278	41,1%	65,0%	100,0%	80,9%	68,80%	0,19%
	4	2,3	115,1	0,24	309	4,460	3,901	50,0%	73,9%	98,9%	83,1%	72,80%	1,39%
Bloco 2	1	1,2	124,1	0,31	262	4,93	4,487	0,360	83,8%	95,1%	79,5%	66,2%	1,64%
	2	1,2	124,8	0,37	303	6,77	5,278	0,000	-	-	-	-	22,05%
	3	1,2	126,2	0,26	268	4,21	3,388	0,761	68,6%	99,6%	87,0%	78,9%	1,50%
	4	1,2	127,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bloco 3	1	1,5	140,1	0,45	322	8,78	8,627	0,035	25,5%	100,0%	62,2%	29,3%	1,28%
	2	1,5	140,9	0,52	244	7,64	6,357	1,155	74,3%	98,3%	85,0%	75,9%	1,72%
	3	1,5	143,6	0,59	323	11,51	10,936	0,409	63,4%	99,6%	75,3%	57,9%	1,39%
	4	1,51	143,8	0,42	294	7,43	6,484	0,852	69,3%	99,5%	82,6%	70,8%	1,32%